

---

# **DIPLOMARBEIT**

---

Herr B.Sc.  
**Jan Tietböhl**

**Untersuchungen zur Tieftem-  
peraturzähigkeit beim Unter-  
pulverschweißen von hoch-  
festen, vergüteten Stählen**

Mittweida, 2016



# **DIPLOMARBEIT**

---

## **Untersuchungen zur Tieftemperaturzähigkeit beim Unterpulverschweißen von hochfesten, vergüteten Stählen**

Autor:

**Herr B.Sc.**

**Jan Tietböhl**

Studiengang:

**Maschinenbau**

Seminargruppe:

**MB15w1-A**

Erstprüfer:

**Prof. Dr.-Ing. Peter Hübner**

Zweitprüfer:

**Dr. Rigo Peters**

Einreichung:

**Mittweida, 30.09.2016**

Verteidigung/Bewertung:

**Mittweida, 2016**





## **Bibliografische Beschreibung:**

Tietböhl, Jan:

Untersuchungen zur Tieftemperaturzähigkeit beim Unterpulverschweißen von hochfesten, vergüteten Stählen. - 2016. - 17, 87, 144 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Ingenieurwissenschaften, Diplomarbeit, 2016

## **Referat**

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Unterpulverschweißen hochfester, vergüteter Feinkornbaustähle. Am Beispiel eines Stahls der Güte S960QL wird das Verfahrensprinzip des UP-Schweißens zur Herstellung qualitätsgerechter Schweißnähte dargestellt. Es wird der Ablauf von der ersten Versuchsreihe über eine statistische Auswertung bis hin zum Schweißen einer Verfahrensprüfung geschildert. Das Ziel der Arbeit ist es, geeignete Parameter für das Unterpulverschweißen für besagte Feinkornbaustähle zu generieren.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>IV</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>X</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>XII</b>
<b>1      Einleitung.....</b>	<b>15</b>
<b>2      Aufgabenstellung .....</b>	<b>17</b>
<b>3      Stand der Technik .....</b>	<b>19</b>
3.1 <i>Schweißtechnische Verarbeitung hochfester Feinkornbaustähle .....</i>	<i>19</i>
3.2 <i>Das Verfahren .....</i>	<i>21</i>
3.2.1      Varianten des Unterpulverschweißens .....	23
3.2.1.1      Unterpulver-Eindrahtschweißen .....	23
3.2.1.2      MPSAW-Verfahren.....	24
3.2.1.3      Unterpulver-Heißdrahtschweißen .....	24
3.2.1.4      I <sup>2</sup> Rt-Verfahren .....	25
3.2.1.5      Unterpulver-Doppeldrahtschweißen .....	25
3.2.1.6      Unterpulver-Bandschweißen .....	26
3.2.1.7      Unterpulver-Tandemschweißen.....	27
3.2.2      Lichtbogenzündung .....	28
3.2.3      Wärmebilanz .....	30
3.2.4      Schlacke .....	30
3.2.5      Stromquellen für das Unterpulverschweißen .....	31
3.2.6      Regelung der Lichtbogenlänge.....	33
3.2.7      Zusatz- und Hilfswerkstoffe .....	34
3.2.7.1      Draht- und Bandelektroden .....	35
3.2.7.2      Schweißpulver.....	36
<b>4      Versuchseinrichtung und Versuchswerkstoffe.....</b>	<b>43</b>
4.1 <i>Versuchsplanung.....</i>	<i>43</i>
4.2 <i>Versuchsaufbau .....</i>	<i>43</i>
4.3 <i>Versuchswerkstoffe .....</i>	<i>46</i>

---

4.4	Probenvorbereitung .....	50
4.5	Schweißzusatz- und Hilfswerkstoffe.....	52
<b>5</b>	<b>Versuchsdurchführung und Auswertung.....</b>	<b>54</b>
5.1	Prüfverfahren für die Qualifizierung eines Schweißprozesses nach DIN EN ISO 15614-1.....	54
5.1.1	Sichtprüfung nach DIN EN ISO 17637 .....	54
5.1.2	Magnetpulverprüfung nach DIN EN ISO 17638.....	55
5.1.3	Ultraschallprüfung nach DIN EN ISO 17640.....	55
5.1.4	Querschugprüfung nach DIN EN ISO 4136.....	56
5.1.5	Biegeprüfung nach DIN EN ISO 5173 .....	57
5.1.6	Kerbschlagbiegeprüfung nach DIN EN ISO 9016.....	58
5.1.7	Makroskopische und mikroskopische Untersuchung von Schweißnähten gemäß DIN EN ISO 17639.....	59
5.1.8	Härteprüfung gemäß DIN EN ISO 9015-1 .....	60
5.1.9	Bewertung von Unregelmäßigkeiten gemäß DIN EN ISO 5817.....	60
5.2	Vorversuche.....	62
5.2.1	Durchführung der Vorversuche .....	62
5.2.2	Auswertung der Vorversuche .....	65
5.2.2.1	Zerstörungsfreie Prüfungen.....	65
5.2.2.2	Zerstörende Prüfungen .....	66
5.2.2.2.1	Kerbschlagbiegeversuch.....	66
5.2.2.2.2	Zugversuch .....	67
5.2.2.2.3	Härteprüfung nach Vickers.....	68
5.2.2.2.4	Makroskopische und mikroskopische Untersuchung .....	72
5.2.2.3	Statistische Auswertung der erreichten Zugfestigkeiten .....	81
5.3	Hauptversuch.....	85
5.3.1	Durchführung des Hauptversuches.....	85
5.3.2	Auswertung des Hauptversuches.....	88
5.3.2.1	Kerbschlagbiegeversuch.....	88
5.3.2.2	Zugversuch .....	90
5.3.2.3	Biegeversuch .....	93
5.3.2.4	Härteprüfung .....	96
5.3.2.5	Makroskopische und mikroskopische Untersuchung .....	98
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>102</b>
6.1	Zusammenfassung .....	102
6.2	Ausblick .....	102

<b>Literatur .....</b>	<b>104</b>
<b>Anlagen .....</b>	<b>108</b>
<b>Anlagen, Teil 1 .....</b>	<b>109</b>
3.1-Zeugnis des Versuchswerkstoffes S960QL (Schmelze 682458) .....	110
3.1-Zeugnis Schweißzusatzwerkstoff UP101-NiCrMo2,5.....	113
Datenblatt Schweißpulver OP121TT [10] .....	114
<b>Anlagen, Teil 2.....</b>	<b>120</b>
Protokolle Kerbschlagbiegeversuche .....	121
Protokolle der Zugversuche.....	201
Protokolle der Härteprüfung .....	212
Makroschliffe .....	222
Mikroschliffe .....	223
<b>Anlagen, Teil 3.....</b>	<b>230</b>
Tabelle 19 - Übersicht Schweißdaten Hauptversuch .....	231
Datenblatt Schweißzusatzwerkstoff Union X96 (für Wurzellage) .....	234
Protokoll der Sichtprüfung .....	235
Protokoll der Magnetpulverprüfung.....	237
Protokoll der Ultraschallprüfung.....	238
Protokolle der Kerbschlagbiegeversuche .....	240
Protokoll der Zugversuche.....	248
Protokoll der Biegeversuche.....	249
Protokoll der Härteprüfung .....	250
<b>Selbstständigkeitserklärung .....</b>	<b>252</b>

---

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Entwicklung der Baustähle in Deutschland [16] .....	15
Abbildung 2 - Verfahrensprinzip Unterpulverschweißen (schematisch) [38] .....	21
Abbildung 3 - Ablösen der Schlacke nach dem UP-Schweißprozess .....	22
Abbildung 4 - UP-Eindrahtschweißen (schematisch) [12] .....	23
Abbildung 5 - MPSAW-Verfahren (schematisch) [12] .....	24
Abbildung 6 - UP-Heißdrahtverfahren (schematisch) [12] .....	24
Abbildung 7 - UP- $I^2Rt$ -Verfahren (schematisch) [12] .....	25
Abbildung 8 - UP-Doppeldraht- oder Parallelschweißen (schematisch) [7] .....	25
Abbildung 9 - UP-Bandschweißen (schematisch) [12] .....	26
Abbildung 10 - UP-Tandemschweißen (schematisch) [12] .....	27
Abbildung 11 - Wärmebilanz beim UP-Schweißen [12] .....	30
Abbildung 12 - Einteilung der Schweißstromquellen zum UP-Schweißen nach [13] .....	31
Abbildung 13 - Verschiebung der Zeit- und Amplitudenbalance [14] .....	32
Abbildung 14 - Vergleich Gleichstrom (a), Wechselstrom (b) und Wechselstrom mit Verschiebung der Zeit- und Amplitudenbalance (c) [14] .....	32
Abbildung 15 - Querschnittformen von Fülldrahtelektroden [16] .....	36
Abbildung 16 - Schematische Darstellung der Herstellung von Schweißpulvern [12] .....	37
Abbildung 17 - Einfluss der Pulverzusammensetzung auf die Kerbschlagzähigkeit des Schweißgutes [12] .....	39

Abbildung 18 - UP-Schweißanlage mit Pulverbehälter (1), Drahtführung und –förderung (2), Tandemschweißkopf (3) und Schweißtisch (4) (Hersteller: SLV M-V GmbH, Lincoln Electric) .....	44
Abbildung 19 - Stromquellen 'Lincoln Electric' Power Wave AC/DC 1000 SD.....	44
Abbildung 20 - Tandemschweißkopf mit Geschwindigkeitsregelung (1), Pulverzuführung (2) und –absaugung (3) .....	44
Abbildung 21 - Elektrodenofen zum Rücktrocknen des Schweißpulvers.....	45
Abbildung 22 - Einflussgrößen auf die Vorwärmtemperatur [20].....	47
Abbildung 23 - Temperatureinfluss auf das Gefüge während des Schweißprozesses [4]	48
Abbildung 24 - Ausbildung von Troostitrosetten bei 1000-facher Vergrößerung (Markierung der bräunlich eingefärbten Bereiche durch Pfeile) .....	48
Abbildung 25 - Markierung: Seigerungszonen im Grundwerkstoff .....	49
Abbildung 26 - Nahtvorbereitung unsymmetrische Doppel-Y-Fuge der Vorversuche.....	50
Abbildung 27 - Schweißprobe mit Ein- und Auslaufblech.....	51
Abbildung 28 - Zu- und Abbrandverhalten von Si und Mn bei Verwendung des Schweißpulvers OP121TT/W (Oerlikon) [9] .....	52
Abbildung 29- Universal-Werkstoffprüfmaschine Zwick Z600 (Zug- und Druckkraft: 600 kN) .....	56
Abbildung 30 - Lage der Zugproben im Blech mit $t = 50$ mm (schematisch) .....	57
Abbildung 31 - Pendelschlagwerk (Arbeitsinhalt des Pendels: 450 Joule) .....	59
Abbildung 32 - ZZVP der Schweißversuche S960QL .....	63
Abbildung 33 - Vorwärmen der Schweißprobe (Markierung: Temperatureaufnahme mittels Thermoelement).....	64
Abbildung 34 - Bildung von Wasser auf der Blechoberfläche während des Vorwärmens	65
Abbildung 35 - Härteprüfmaschine ZHV 10 (Hersteller: Zwick & Roell).....	69

---

Abbildung 36 - Lage der Härteeindrücke im Makroschliff .....	69
Abbildung 37 - Manuelles metallographisches Nassschleifgerät (Hersteller: Buehler) .....	72
Abbildung 38 - Makroschliff des ersten Schweißversuches (Markierung: Unregelmäßigkeit gemäß DIN EN ISO 5817: ungenügende Durchschweißung) .....	73
Abbildung 39 - Makroschliff Probe 1 (Ätzung: nach Adler) .....	74
Abbildung 40 - Makroschliff Probe 5 (Ätzung: nach Adler) Markierung: Schlackeeinschluss zwischen Schweißraupe 1 und 2 der Oberseite .....	74
Abbildung 41 - Warmeinbettpresse LaboPress-3 (Hersteller: Struers) .....	75
Abbildung 42 - präparierte Mikroschliffe in transparenter und schwarzer Einbettmasse ..	76
Abbildung 43 - Halbautomatische metallographische Nassschleif- und Poliermaschine (Hersteller: Struers) .....	76
Abbildung 44 - Auflichtmikroskop Leica DM6000M .....	77
Abbildung 45 - Mikroschliff Run 5: Übersicht Schweißverbindung 12,5-fach (Ätzung: Nital) .....	78
Abbildung 46 - Mikroschliff Run 5: Übersicht Schweißverbindung 50-fach (Ätzung: Nital)	78
Abbildung 47 - Mikroschliff Run 5: Schweißgut 500-fach (Ätzung: Nital) .....	79
Abbildung 48 - Mikroschliff Run 5: Grobkornzone 500-fach (Ätzung: Nital) .....	79
Abbildung 49 - Mikroschliff Run 5: Feinkornzone 500-fach (Ätzung: Nital) .....	80
Abbildung 50 - Mikroschliff Run 5: Zone der teilweise Gefügeumwandlung 500-fach (Ätzung: Nital) .....	80
Abbildung 51 - Mikroschliff Run 5: Grundwerkstoff 500-fach (Ätzung: Nital) .....	80
Abbildung 52 - Ermittelte Zugfestigkeiten, Vergleich beobachtete Werte - Prognosewerte (Auszug aus dem Programm Statistica®) .....	82
Abbildung 53 - Ermittelte Zugfestigkeiten, Vergleich beobachtete Werte - Prognosewerte nach Entfernen von Probe 1, Probe 6 und Probe 8 (Auszug aus dem Programm Statistica®) .....	83

Abbildung 54 - Einflusses der Eingangsparameter auf das Ergebnis Zugfestigkeit nach Entfernen von Probe 1, Probe 6 und Probe 8 (Auszug aus dem Programm Statistica®) .	84
Abbildung 55 - Abmessungen der geänderten Nahtvorbereitung für den Hauptversuch ..	86
Abbildung 56 - Nahtgeometrie (schematisch) .....	86
Abbildung 57 - Vorbereitete Schweißprobe mit keramischer Badsicherung (Pfeil) .....	87
Abbildung 58 - Probe 0866/16-K3 (links) / Probe 0866/16-K8 (rechts) .....	89
Abbildung 59 - Duktile Bruchfläche (links) / Sprödbbruchfläche (rechts) .....	89
Abbildung 60 - Übersicht: Vergleich Probe Z1.1 (oben) und Probe 2.2 (unten) .....	92
Abbildung 61 - Längenunterschied von 16,5 mm nach Zugversuch (oben: Probe Z1.1 / unten: Probe Z2.2) .....	92
Abbildung 62 - Seitenbiegeproben Hauptversuch (von links nach rechts: Probe B1, Probe B2, Probe B3, Probe B4) .....	93
Abbildung 63 - Seitenbiegeprobe B1: zulässige Unregelmäßigkeit (jeder Anriss < 3 mm)	94
Abbildung 64 - Seitenbiegeprobe B3: unzulässige Unregelmäßigkeit (Bruch bei Biegewinkel 85°) .....	94
Abbildung 65 - Seitenbiegeprobe B4: unzulässige Unregelmäßigkeit (seitlicher Anriss > 3 mm / Länge des Anrisses: 12 mm) .....	95
Abbildung 66 - Lage der Härteeindrücke im Makroschliff .....	97
Abbildung 67 - Probe 0866/16 Makroschliff (Ätzung: nach Adler) .....	98
Abbildung 68 - Mikroschliff Hauptversuch: Übersicht Schweißverbindung 50-fach (Ätzung: Nital) .....	99
Abbildung 69 - Mikroschliff Hauptversuch: Schweißgut 500-fach (Ätzung: Nital) .....	99
Abbildung 70 - Mikroschliff Hauptversuch: Grobkornzone 500-fach (Ätzung: Nital) .....	100
Abbildung 71 - Mikroschliff Hauptversuch: Feinkornzone 500-fach (Ätzung: Nital) .....	100



---

Abbildung 72 - Mikroschliff Hauptversuch: Zone der teilweisen Gefügeumwandlung 500-fach (Ätzung: Nital) .....	101
Abbildung 73 - Mikroschliff Hauptversuch: Grundwerkstoff 500-fach (Ätzung: Nital) .....	101
Abbildung 74 - Makroschliff links: Run 2 / rechts: Run 3 (Ätzung: nach Adler) .....	222
Abbildung 75 - Makroschliff links: Run 4 / rechts: Run 6 (Ätzung: nach Adler) .....	222
Abbildung 76 - Makroschliff links: Run 7 / rechts: Run 8 (Ätzung: nach Adler) .....	222
Abbildung 77 - Makroschliff links: Run 9 / rechts Run 10 (Ätzung: nach Adler) .....	223
Abbildung 78 - Mikroschliff links Run 6 Übersicht 12,5-fach / rechts: Übersicht 50-fach (Ätzung: Nital) .....	223
Abbildung 79 - Mikroschliff rechts: Run 6 Schweißgut 500-fach / rechts: Grobkornzone 500-fach (Ätzung: Nital) .....	223
Abbildung 80 - Mikroschliff Run 6 links: Feinkornzone 500-fach / rechts: Zone der teilweisen Gefügeum-wandlung 500-fach (Ätzung: Nital) .....	224
Abbildung 81 - Mikroschliff Run 6 unbeeinflusster Grundwerkstoff 500-fach (Ätzung: Nital) .....	224
Abbildung 82 - Mikroschliff links Run 7 Übersicht 12,5-fach / rechts: Übersicht 50-fach (Ätzung: Nital) .....	224
Abbildung 83 - Mikroschliff rechts: Run 7 Schweißgut 500-fach / rechts: Grobkornzone 500-fach (Ätzung: Nital) .....	225
Abbildung 84 - Mikroschliff Run 7 links: Feinkornzone 500-fach / rechts: Zone der teilweisen Gefügeumwandlung 500-fach (Ätzung: Nital) .....	226
Abbildung 85 - Mikroschliff Run 7 unbeeinflusster Grundwerkstoff 500-fach (Ätzung: Nital) .....	226
Abbildung 86 - Mikroschliff links Run 8 Übersicht 12,5-fach / rechts: Übersicht 50-fach (Ätzung: Nital) .....	226
Abbildung 87 - Mikroschliff rechts: Run 8 Schweißgut 500-fach / rechts: Grobkornzone 500-fach (Ätzung: Nital) .....	227

Abbildung 88 - Mikroschliff Run 8 links: Feinkornzone 500-fach / rechts: Zone der teilweisen Gefügeum-wandlung 500-fach (Ätzung: Nital) .....	227
Abbildung 89 - Mikroschliff Run 8 unbeeinflusster Grundwerkstoff 500-fach (Ätzung: Nital) .....	227
Abbildung 90 - Mikroschliff links Run 9 Übersicht 12,5-fach / rechts: Übersicht 50-fach (Ätzung: Nital) .....	228
Abbildung 91 - Mikroschliff rechts: Run 9 Schweißgut 500-fach / rechts: Grobkornzone 500-fach (Ätzung: Nital).....	228
Abbildung 92 - Mikroschliff Run 9 links: Feinkornzone 500-fach / rechts: Zone der teilweisen Gefügeum-wandlung 500-fach (Ätzung: Nital) .....	228
Abbildung 93 - Mikroschliff Run 9 unbeeinflusster Grundwerkstoff 500-fach (Ätzung: Nital) .....	229

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - chemische Zusammensetzung (Schmelzenanalyse) [1] .....	19
Tabelle 2 - mechanische Eigenschaften eines Stahls der Güte S960QL [1] .....	19
Tabelle 3 - Hauptbestandteile der Schweißpulver nach DIN EN ISO 14174:2012-05 [18] .....	40
Tabelle 4 - Einteilung der Schweißpulver nach Pulverklassen gemäß DIN EN ISO 14174:2012-05 [18] .....	41
Tabelle 5 - chemische Zusammensetzung des Grundwerkstoffes S960QL (Charge 682458)* .....	46
Tabelle 6 - Hauptbestandteile OP121TT/W .....	52
Tabelle 7 - Chemische Zusammensetzung in % (Massivdrahtelektrode UP-101 NiCrMo 2,5 (S3 NiCrMo 2,5)) .....	53
Tabelle 8 - Ergebnisse Kerbschlagbiegeversuch S960QL -40°C [28] .....	62
Tabelle 9 - Übersicht über die Schweißparameter *Startplatz in der Schweißreihenfolge .....	63
Tabelle 10 - Ergebnisse der Zugversuche aus den Vorversuchen .....	67
Tabelle 11 - Übersicht Schweißreihenfolge und -parameter .....	81
Tabelle 12 - Effektschätzung des Einflusses der Eingangsparameter auf das Ergebnis Zugfestigkeit (Auszug aus dem Programm Statistica®) .....	83
Tabelle 13 - Effektschätzung des Einflusses der Eingangsparameter auf das Ergebnis Zugfestigkeit nach Entfernen von Probe 1, Probe 6 und Probe 8 (Auszug aus dem Programm Statistica®) .....	84
Tabelle 14 - Übersicht Schweißparameter (Hauptversuch) .....	85
Tabelle 15 - Ergebnisse Kerbschlagarbeit (Hauptversuch) .....	88

Tabellenverzeichnis	XI
<hr/>	
Tabelle 16 - Ergebnisse Zugfestigkeit (Hauptversuch) .....	90
Tabelle 17 - Ergebnisse Biegeversuch (Hauptversuch) .....	93
Tabelle 18 - Ergebnisse Härteprüfung (Hauptversuch) .....	96
Tabelle 19 - Übersicht Schweißdaten Hauptversuch .....	231

## Abkürzungsverzeichnis

<b>°C</b>	Grad Celsius
<b>µm</b>	Mikrometer
<b>A</b>	Ampere
<b>AC</b>	Wechselstrom
<b>A<sub>C1</sub></b>	unterer Umwandlungspunkt (Auflösung des Perlits zu Austenit) [A = <i>arret</i> (franz.: stoppen) / C = <i>chauffage</i> (franz.: Aufheizung)]
<b>A<sub>C3</sub></b>	oberer Umwandlungspunkt (Ferritumwandlung zu Austenit ist beendet)
<b>B</b>	Bor
<b>bzw.</b>	beziehungsweise
<b>C</b>	Kohlenstoff
<b>C<sub>3</sub>H<sub>8</sub></b>	Propan
<b>CET</b>	Kohlenstoffäquivalent nach Uwer und Höhne
<b>CEV</b>	Kohlenstoffäquivalent nach Maßgabe IIW
<b>CO<sub>2</sub></b>	Kohlendioxid
<b>Cr</b>	Chrom
<b>Cu</b>	Kupfer
<b>D</b>	in Verbindung mit SG oder SL: Decklage
<b>d.h.</b>	das heißt
<b>DC</b>	Gleichstrom
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung
<b>EKD</b>	Eisen-Kohlenstoff-Diagramm
<b>EN</b>	Europäische Norm
<b>Fe<sub>3</sub>C</b>	Zementit
<b>g</b>	Gramm
<b>ggf.</b>	gegebenenfalls
<b>H<sub>2</sub>O</b>	Wasser
<b>HV</b>	Härte nach Vickers
<b>I</b>	Formelzeichen Strom (hier: Schweißstrom)
<b>IIW</b>	International Institute of Welding
<b>inkl.</b>	inklusive
<b>ISO</b>	Internationale Organisation für Normung
<b>J</b>	Joule
<b>kJ</b>	Kilojoule
<b>kN</b>	Kilonewton
<b>L</b>	Stahlgütegruppe mit festgelegten Mindestwerten der Kerbschlagarbeit bei Temperaturen bis - 40 °C [1]

<b>M</b>	in Verbindung mit SG oder SL: Mitte
<b>max.</b>	maximal
<b>MHz</b>	Megahertz
<b>min</b>	Minute
<b>ml</b>	Milliliter
<b>mm</b>	Millimeter
<b>mm<sup>2</sup></b>	Quadratmillimeter
<b>Mn</b>	Mangan
<b>Mo</b>	Molybdän
<b>N</b>	Newton
<b>Nb</b>	Niob
<b>Ni</b>	Nickel
<b>O<sub>2</sub></b>	Sauerstoff
<b>P</b>	Phosphor
<b>Q</b>	Stahlgüte Q (=vergütet)
<b>R<sub>eH</sub></b>	obere Streckgrenze
<b>R<sub>m</sub></b>	Zugfestigkeit
<b>S</b>	(in Stahlbezeichnungen) Stähle für Stahlbau
<b>S</b>	Schwefel
<b>SEW</b>	Stahl-Eisen-Werkstoffblatt
<b>SG</b>	Schweißgut
<b>Si</b>	Silizium
<b>SL</b>	Schmelzlinie
<b>SLV M-V</b>	Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Mecklenburg-Vorpommern
<b>SZTU</b>	Schweiß-Zeit-Temperatur-Umwandlung
<b>t</b>	Formelzeichen Blechdicke
<b>Ti</b>	Titan
<b>U</b>	Formelzeichen Spannung (hier: Schweißspannung)
<b>u.a.</b>	unter anderem
<b>UP</b>	Unterpulver
<b>V</b>	Vanadium
<b>V</b>	Volt
<b>v</b>	Formelzeichen Geschwindigkeit (hier: Schweißgeschwindigkeit)
<b>WEZ</b>	Wärmeeinflusszone
<b>Zr</b>	Zirkonium
<b>ZTU</b>	Zeit-Temperatur-Umwandlung



# 1 Einleitung

Im Zeitalter der schwindenden Ressourcen steigt der Bedarf an innovativen Technologien. Dies betrifft sowohl die Werkstoffherstellung, als auch die Fertigung neuer Erzeugnisse. Beispielsweise sind leichte Werkstoffe mit hohen Festigkeiten und guten Schweiß Eigenschaften der Wunsch eines jeden Konstrukteurs bzw. Ingenieurs, der im Automobil-, Schiff-, Anlagen-, Rohrleitungs-, Flugzeug- oder auch im Maschinenbau tätig ist.

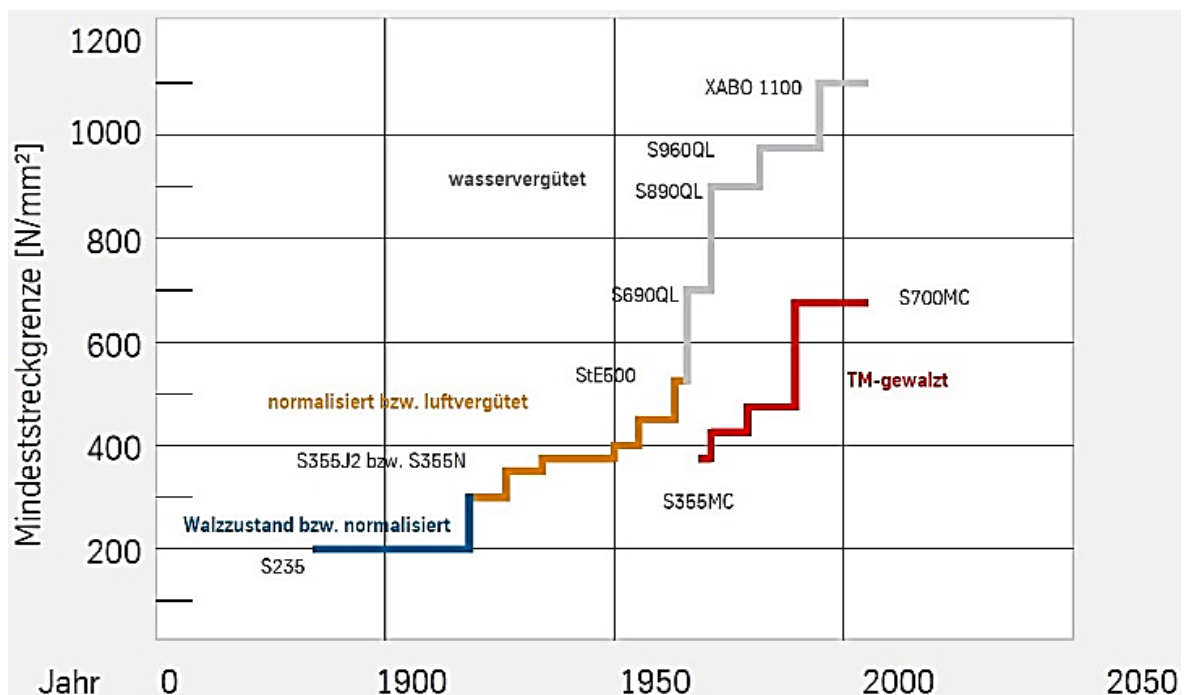


Abbildung 1 - Entwicklung der Baustähle in Deutschland [16]

Die Verarbeitung von hochfesten Stählen ist in Deutschland seit etwa 1970 fester Bestandteil der metallverarbeitenden Industrie. Bereits ab den 1920er Jahren war man bestrebt, die Festigkeit und Zähigkeit einer Stahlsorte wie S235 zu erhöhen (Abbildung 1). Dies erreichte man, wie auf der Abbildung zu erkennen ist, zunächst durch die Verfestigung des Gefüges durch Warmwalzen. Später erweiterte sich das Bearbeitungsspektrum. Den mechanischen Bearbeitungsschritten des Walzens folgten bald physikalische Vorgänge - z.B. das Glühen. Durch die Wärmebehandlung und später durch das Vergüten war es möglich, die Eigenschaften der Stähle bis zu den heute bekannten Festigkeitswerten zu steigern. Der Vorteil dieser Stähle ist, dass bei einer Konstruktion Material und somit Gewicht eingespart werden kann, da die höheren Festigkeiten kleinere Querschnitte der Bauteile erlauben [2]. Auch sind mit diesen Stählen Konstruktionen möglich, die mit Stahlsorten niedrigerer Festigkeit nicht realisierbar wären.



Viele der hochfesten Baustähle sind mit den in der Praxis gebräuchlichen Schweißverfahren schweißbar. Besonders etabliert haben sich hierbei Metall-Schutzgas-Schweißanwendungen, da sie gut automatisierbar sind und im Schweißgut einen vergleichsweise geringen Wasserstoffgehalt erzielen. Bei steigenden Blechdicken stellt sich beim Schutzgasschweißen allerdings die Frage nach der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens. Bei industriellen Anwendungen setzt man hier bevorzugt auf das Unterpulverschweißverfahren.

Anfang der dreißiger Jahre des 20. Jahrhunderts entwickelt, ist das Unterpulverschweißen im Schiff-, Kran-, Stahl- und Rohrleitungsbau fest etabliert [3]. Manuelle Schweißverfahren bedürfen generell einer hohen Qualifikation des Schweißpersonals, da der Schweißer bei diesen Verfahren unmittelbaren Einfluss auf die Qualität und das Aussehen der Schweißnaht ausübt. Bei vollmechanisierten oder automatisierten Schweißverfahren steht das handwerkliche Können des Schweißers im Hintergrund, da sämtliche Abweichungen von der Steuerungs- und Regelungstechnik erkannt werden und diesen Unregelmäßigkeiten dann mit geeigneten Maßnahmen entgegen gewirkt wird. Neben der Bedienung der Schweißanlage muss das eingesetzte Schweißpersonal den Schweißprozess visuell überwachen und Kenntnisse über die verwendeten Zusatz- und Hilfswerkstoffe haben, da diese natürlich im Laufe des Schweißvorganges verbraucht und demzufolge ersetzt werden müssen.

Die verwendeten Schweißzusatz- und Hilfswerkstoffe müssen den Anforderungen des zu verschweißenden Stahls genügen. Üblicherweise muss ein hochfester Feinkornbaustahl mit einer Streckgrenze von  $960 \text{ N/mm}^2$  auch mit einem Schweißzusatzwerkstoff geschweißt werden, der im reinen Schweißgut eine gleichwertige Streckgrenze aufweist. Bei einer Schweißverbindung ist darauf zu achten, dass die mechanischen Gütewerte des Schweißgutes und der WEZ gleich, besser oder zumindest ähnlich denen des Grundwerkstoffes sind. Auch sollten sich die Werkstoffkennwerte des Grundwerkstoffes nicht nachteilig durch den Wärmeeintrag ändern. Gefügeveränderungen lassen sich durch das Einbringen von Wärme nicht gänzlich vermeiden. Hochfeste Stähle erreichen ihre Festigkeitseigenschaften durch eine gezielte Beeinflussung ihrer Gefügestruktur. Wärmeeinbringung durch den Schweißprozess kommt einer Wärmebehandlung des Grundwerkstoffes in der WEZ gleich. Die daraus resultierenden Gefügeänderungen wirken sich bei hochfesten Stählen meist nachteilig auf die Festigkeit bzw. Zähigkeit aus. Die Schwächungszonen befinden sich überwiegend im Bereich der Wärmeeinflusszone. Während die un- und niedriglegierten Stähle geringerer Festigkeit nach dem Schweißprozess einer Wärmebehandlung unterzogen werden können, damit sich ihre Eigenschaften wieder einstellen, gestaltet sich das Schweißen hochfester Stähle in diesem Punkt problematisch und ist nach wie vor Gegenstand aktueller Forschung [2] [4].

## 2 Aufgabenstellung

Durch den engen Kontakt mit Unternehmen aus der Region im Bereich der Werkstoffprüfung hat sich herausgestellt, dass bei der Verarbeitung von hoch- und höchstfesten Stählen unter Anwendung des hochenergetischen Unterpulver-Schweißverfahrens große Probleme bestehen, die geforderten mechanisch-technologischen Gütwerte im Tieftemperaturbereich (bis  $-40^{\circ}\text{C}$ ) zu erreichen. Diese Stähle sind nach Herstellerangaben unter Beachtung „entsprechender Schweißbedingungen“ gut schweißgeeignet. Jedoch sind diese seitens der Hersteller vorgegebenen Schweißbedingungen unspezifisch und berücksichtigen nicht den Ausgangszustand des Grundwerkstoffes. So ergeben sich auch bei strikter Beachtung dieser Schweißbedingungen oft unzureichende Zähigkeits- oder Festigkeitseigenschaften der erzeugten Nähte.

Die zu erstellende Arbeit soll sich im Rahmen eines Forschungsvorhabens der SLV M-V GmbH mit der Bestimmung von auf den Grundwerkstoffzustand angepassten Parametersätzen für das Unterpulverschweißen auseinandersetzen.

Die nachfolgenden Einzelaufgaben, die im Rahmen des Projektmoduls bearbeitet werden, sollen dazu einen Beitrag liefern.

Einzelaufgaben:

1. Über eine Literaturrecherche ist der Stand der Technik zum Thema der Arbeit zu erfassen.
2. Durchführung und Auswertung von Vorversuchen an S960QL (Kerbschläge).

Im Rahmen der anzuschließenden Diplomarbeit soll die Fragestellung anhand folgender, weiterführender Aufgaben bearbeitet werden:

1. Planung und Durchführung der statistischen Versuche zum Mehrdraht-UP-Schweißen an S960QL
2. Auswertung der statistischen Versuche und Einschätzung der Ergebnisse hinsichtlich des Einflusses der Parametervariation.
3. Übersichtliche Dokumentation der Ergebnisse.

Das Hauptziel der Arbeit besteht darin, geeignete Parametersätze zur Erzeugung qualitätsgerechter Nähte für den Einsatz des Unterpulverschweißens an hochfesten Stählen für den Einsatz im Tieftemperaturbereich zu finden.



### 3 Stand der Technik

#### 3.1 Schweißtechnische Verarbeitung hochfester Feinkornbaustähle

Unter hochfesten Stählen versteht man nach DIN EN 10025-6 vergütete Stähle mit einer Mindeststreckgrenze von 460 N/mm<sup>2</sup> bis 960 N/mm<sup>2</sup>. Aktuelle Vergütungsverfahren erlauben gegenwärtig Streckgrenzen von 1100 N/mm<sup>2</sup> bis 1300 N/mm<sup>2</sup>. Diese Stähle sind zwar schon bei Stahlherstellern erhältlich, werden allerdings in der aktuellen Fassung der DIN EN 10025-6 (Ausgabe 08/2009) noch nicht berücksichtigt. Daher richten sich die Betrachtungen dieser Projektarbeit auf Stähle mit einer Mindeststreckgrenze von 960 N/mm<sup>2</sup>.

Gemäß der Norm dürfen Stähle der Gütegruppe L folgende maximale Gehalte der in der Tabelle 1 aufgeführten Elemente enthalten:

**Tabelle 1 - chemische Zusammensetzung (Schmelzenanalyse) [1]**

C %	Si %	Mn %	P %	S %	N %	B %	Cr %	Cu %	Mo %	Nb %	Ni %	Ti %	V %	Zr %
max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.
0,20	0,80	1,70	0,020	0,010	0,015	0,005	1,50	0,50	0,70	0,06	2,0	0,05	0,12	0,15

Auch die mechanischen Eigenschaften sind in der Norm festgelegt (Tabelle 2):

**Tabelle 2 - mechanische Eigenschaften eines Stahls der Güte S960QL [1]**

Mindeststreckgrenze $R_{eH}$ in N/mm <sup>2</sup>	Zugfestigkeit $R_m$ in N/mm <sup>2</sup>	Mindestbruchdehnung $L_0$ in %	Mindestwerte der Kerbschlagarbeit in J bei -40°C
960	980 - 1150	10	30 (längs) / 27 (quer)

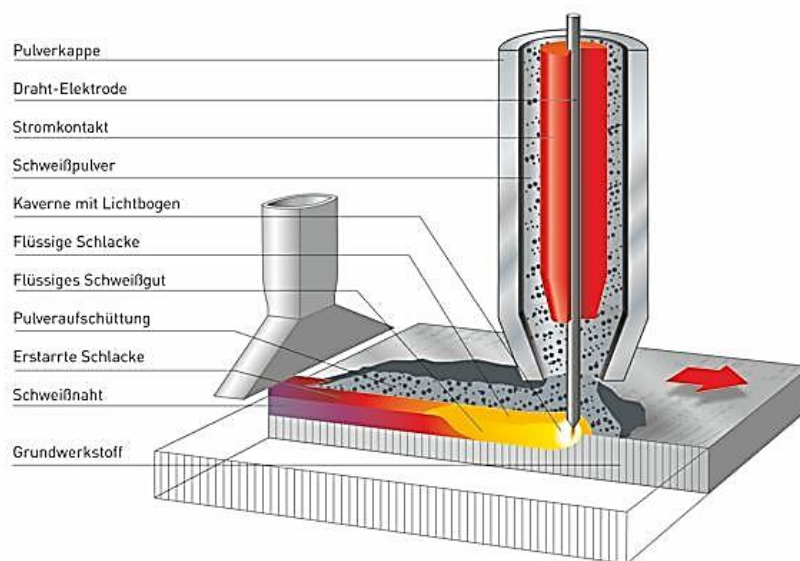
*(Mindeststreckgrenze, Zugfestigkeit und Bruchdehnung sind bei Raumtemperatur zu ermitteln)*

Niedrig legierte, nicht wärmebehandelte Baustähle weisen im Vergleich zu Stählen mit hoher Festigkeit und Zähigkeit ein relativ grobkörniges Gefüge aus Ferrit und Perlit auf. Perlit wiederum besteht aus Ferrit und Zementit (Fe<sub>3</sub>C). Um die Festigkeitswerte zu erhöhen, müssen mittels einer Wärmebehandlung die Zementit-Ausscheidungen und der dort gebundene Kohlenstoff gelöst werden. Deshalb werden Stähle einem Prozess unterzogen, der als Vergüten bezeichnet wird. Die Vergütung eines Stahls läuft in mehreren Prozessschritten ab: Nach der Herstellung der Bramme erfolgt eine Wärmebehandlung, die oberhalb der A<sub>C1</sub> Linie des EKD bei mehr als 723°C durchgeführt wird. Man spricht hierbei auch vom Austenitisieren, da sich in diesem Temperaturbereich die Kristallstruktur des Eisens umwandelt. Der so entstandene Austenit ist nun in der Lage, mehr Kohlenstoff

aufzunehmen, als es mit dem Ferrit möglich wäre. Durch eine entsprechend lange Haltezeit, die je nach Blechdicke variieren kann, wird sichergestellt, dass das komplette Gefüge austenitisiert. Die Abkühlung bzw. das Abschrecken muss in einer solchen Geschwindigkeit erfolgen, dass der Kohlenstoff an der Karbidbildung gehindert wird. Durch das schnelle Abschrecken entsteht zunächst ein martensitisches Gefüge, das zwar eine sehr hohe Festigkeit, aber auch eine sehr geringe Zähigkeit aufweist. Um die Zähigkeitseigenschaften zu erhöhen, wird der Stahl im letzten Arbeitsschritt angelassen: Bei einer Temperatur von etwa 550°C löst sich der Kohlenstoff und bildet Karbide. Durch geeignete Wahl von Anlasstemperatur und Anlasszeit kann in diesem Schritt die Größe, Anzahl und Verteilung der sich bildenden Karbide gesteuert werden. Das Ergebnis dieses Prozesses ist ein Vergütungsgefüge, welches zwangsgelösten Kohlenstoff enthält. Bedingt durch den geringen Legierungsgehalt wird beim Abschrecken ein martensitisch-bainitisches Gefüge erzielt. Ferner ist der geringe Anteil an Legierungselementen ausschlaggebend für die Schweißbarkeit des Werkstoffes. Um die Schweißbarkeit des Stahls zu gewährleisten, darf das Kohlenstoffäquivalent (CEV) maximal 0,82 betragen [1]. Das Kohlenstoffäquivalent beschreibt den Einfluss der chemischen Zusammensetzung eines Werkstoffes auf das sogenannte Kaltrissverhalten (Rissbildung unterhalb 250°C) haben kann. Kaltrisse können nach dem Schweißen hochfester Feinkornbaustähle innerhalb (seltener neben) der Schweißnaht entstehen. Ursache dafür ist der über die Schmelze eingebrachte Wasserstoff, da Metalle im flüssigen Zustand ein höheres Aufnahmevermögen für Gase haben. Quellen des Wasserstoffs sind das in Elektrodenumhüllungen, in Schutzgasen und in Schweißpulvern enthaltene Wasser. Wasserstoff sammelt sich molekular an den Korngrenzen und übt dort eine gewisse Sprengwirkung aus, die in Überlagerung mit der äußeren Last bzw. Eigenspannungen zum Sprödbruch führt. Um diesem Mechanismus entgegenzuwirken, wird das Material vor dem Schweißen im Bereich der Schweißzone vorgewärmt. Die Höhe der Vorwärmtemperatur ist abhängig von Blechdicke, Wärmeeinbringung, Wasserstoffgehalt des Schweißgutes und des Eigenspannungszustandes [5] [6] [7].

## 3.2 Das Verfahren

Das Unterpulverschweißen ist ein in den 1930er Jahren entwickeltes und hochproduktives mechanisiertes Schweißverfahren mit hochwertigen und reproduzierbaren Nahtqualitäten. Es kommt überwiegend bei Montageprozessen von Großstrukturen und in der Schwerindustrie zum Einsatz. Der Anwendungsbereich reicht vom Schiffbau und dem Bau von Offshore-Strukturen über den Rohrleitungsbau bis hin zum Kraftwerks- und Stahlrahmenbau. Realisierbare Schweißungen mit diesem Verfahren sind überwiegend in Wannen- und Horizontalposition (PA, PB), sowie mit entsprechender Schweißbad- und Pulverstützung in Querposition (PC) durchzuführen im Blechdickenbereich ab 5 mm und unter Ver-



**Abbildung 2 - Verfahrensprinzip Unterpulverschweißen (schematisch) [38]**

wendung der Mehrlagentechnik bis hin zu praktisch unbegrenzter Blechdicke.

Das Unterpulverschweißen (engl. submerged arc welding) wird den verdeckten Lichtbogenschweißverfahren zugeordnet. Es kann zum Auftrag- und Verbindungsschweißen eingesetzt werden. Charakterisiert ist das Verfahren üblicherweise dadurch, dass ein Lichtbogen innerhalb einer Kaverne unter dem Schweißpulver zwischen dem Ende einer endlos zugeführten Draht- oder Bandlektrode und dem Werkstück brennt. Die Elektrode wird über ein Rollensystem und das Pulver über Schläuche und Trichter dem Schweißprozess zugeführt. Das flüssige Schweißgut wird durch Schlacke und aus dem Pulver gebildete Schutzgase vor den schädlichen Einflüssen der Atmosphäre geschützt. Nach dem Schweißvorgang kann, je nach Hersteller, das restliche Pulver über ein Leitungssystem abgesaugt und wieder dem Prozess zugeführt werden. Das Ergebnis des Vorganges ist die Schweißnaht. Ähnlich wie beim Metall-Schutzgas-Schweißen wird auch hier der Strom über ein Stromkontaktrohr erst kurz vor dem Prozess zugeführt. Diese Anordnung erlaubt die Verwendung dicker Drahtelektroden und somit hoher Schweißstromstärken. Durch die

Abschirmung des Schmelzbades in der Kaverne und den daraus resultierenden geringen Abstrahlverlusten des Lichtbogens ergibt sich für das Unterpulverschweißen ein thermischer Wirkungsgrad von etwa 85 % ... 95 %. Im Vergleich dazu hat das Lichtbogenhandschweißen mit seinem nicht abgeschirmten Schmelzbad einen Wirkungsgrad von etwa 50 ... 60 % [7]. Nach dem Erstarren der Schmelze löst sich im Normalfall die Schlacke von selbst. Dies hängt mit den auftretenden Spannungen während des Abkühlens zusammen. Da der obere Teil schneller abkühlt als der untere bewirkt der hohe Temperaturgradient einen Spannungsunterschied, daher „rollt“ sich im günstigsten Fall die Schlacke scheinbar von der Schweißnaht ab (Abbildung 3).



**Abbildung 3 - Ablösen der Schlacke nach dem UP-Schweißprozess**

### 3.2.1 Varianten des Unterpulverschweißens

Leistungssteigernde Effekte können mittels verschiedener Verfahrensvarianten beim Unterpulverschweißen erreicht werden. Im folgenden Abschnitt werden einige dieser Variationen beschrieben. Welcher dieser Varianten im Produktionsprozess der Vorzug gegeben wird, hängt in erster Linie von der anstehenden Schweißaufgabe ab.

#### 3.2.1.1 Unterpulver-Eindrahtschweißen

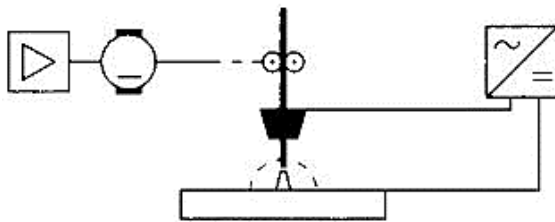


Abbildung 4 - UP-Eindrahtschweißen (schematisch) [12]

Diese Grundvariante des UP-Schweißens zählt zu den am häufigsten angewendeten UP-Schweißvarianten und bildet die Grundlage für alle anderen Variationen des Verfahrens. Das UP-Eindrahtschweißen ist gekennzeichnet durch das Verwenden von:

- einer Drahtelektrode,
- einer Schweißstromquelle und
- einer Prozessregelung.

Diese Verfahrensvariante hat den Vorteil, dass sich mit ihr gegenüber den meisten Lichtbogen- und Widerstandsschweißverfahren (ausgenommen Elektrogas- und Elektroschlacke-Schweißen) höhere Abschmelzleistungen erzielen lassen. Mit dieser Anordnung sind mit entsprechenden Stromquellen Schweißströme bis 1600 A möglich [8]. Der Einbrand bei Verwendung hoher Ströme ist verhältnismäßig tief. Blechdicken bis 25 mm können mit der Lage-Gegenlage-Technik miteinander verschweißt werden. Bei größeren Materialstärken kommt die Mehrlagentechnik zum Einsatz. Theoretisch ist die Blechdicke nach oben hin unbegrenzt. Lediglich die Länge des Brenners und der Aufwand bei der Nahtvorbereitung setzen dem herkömmlichen Verfahren Grenzen. Daher wird bei hohen Wanddicken entweder auf die Steiflankennaht oder die Engspalttechnik zurückgegriffen [6]. Zur Anwendung kommen bei dieser Verfahrensvariante je nach Schweißaufgabe und Hersteller Drahtelektroden mit einem Durchmesser von 1,2 ... 5,0 mm [9] [10] [11].



### 3.2.1.2 MPSAW-Verfahren

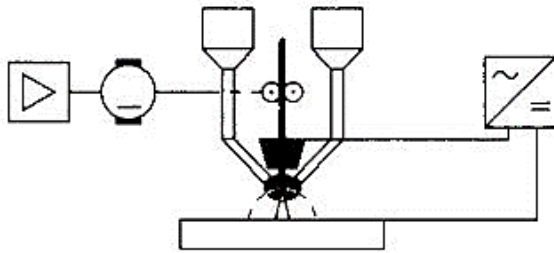


Abbildung 5 - MPSAW-Verfahren (schematisch) [12]

Um die Abschmelzleistung beim Unterpulver-Eindrahtschweißen zu erhöhen, muss nicht zwangsläufig ein zweiter Draht hinzugefügt werden. Einerseits kann Stahlkies, der direkt in die Nahtfuge geschüttet wird, verwendet werden und andererseits kommt das MPSAW-Verfahren zum Einsatz. Bei der Verfahrensvariante MPSAW (**m**etal **p**owder **s**ubmerged **a**rc **w**elding) wird das Metallpulver entweder in die Nahtfuge vor der Elektrode oder dosiert an die Elektrode gefördert. Durch das magnetische Feld, welches die stromdurchflossene Drahtelektrode umgibt, lagert sich das ferromagnetische Metallpulver konzentrisch um die Elektrode an und schmilzt zusammen mit ihr im Lichtbogen ab. Hierbei kann die Abschmelzleistung um 100 % gesteigert werden. Das zusätzlich aufzuschmelzende Metallpulver entzieht dem Lichtbogen Wärme. Dies führt zu verringertem Einbrand bei gleichbleibender Stromstärke. Als Vergleich hierzu diene das UP-Eindrahtschweißen [12].

### 3.2.1.3 Unterpulver-Heißdrahtschweißen

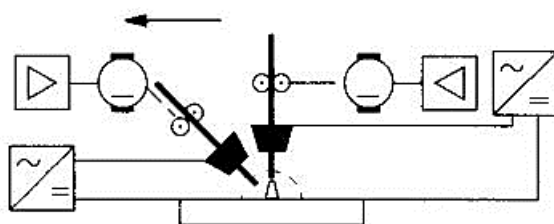


Abbildung 6 - UP-Heißdrahtverfahren (schematisch) [12]

Das UP-Heißdrahtschweißen ist vom Grundaufbau identisch mit dem UP-Eindrahtschweißen. Um die Abschmelzleistung zu erhöhen, wird ein zweiter Draht auf Rotglut gebracht. Der für die Widerstandserwärmung des Drahtes erforderliche Strom wird durch eine zweite Stromquelle, die mit geringem Strom und niedriger Spannung betrieben wird, bereitgestellt. Der zusätzlich nachgeführte Draht schmilzt mit der eigentlichen Drahtelektrode in einem gemeinsamen Lichtbogen ab. Die Energie, die zum Abschmelzen

des Heißdrahtes erforderlich ist, wird dem Lichtbogen entzogen. Dadurch ist es möglich, eine hohe Abschmelzleistung mit einem geringen Wärmeeintrag zu erzielen [12].

### 3.2.1.4 $I^2Rt$ -Verfahren

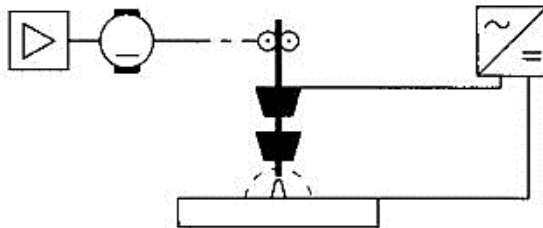


Abbildung 7 - UP- $I^2Rt$ -Verfahren (schematisch) [12]

Eine weitere Variante des UP-Eindrahtschweißens stellt das  $I^2Rt$ -Verfahren dar. Bei dieser Variante erfolgt die Strombeaufschlagung des Drahtes bereits 80 ... 100 mm vor der Prozesszone. Die Führung des Drahtes unmittelbar vor der Schweißstelle erfolgt stromlos. Durch die Joule'sche Erwärmung steigt der Leistungsumsatz im freien Drahtende proportional zu dessen Länge. Ähnlich wie beim UP-Heißdrahtverfahren wird auch hier eine höhere Abschmelzleistung bei gleichbleibendem Schweißstrom erreicht. Für die Stabilität des Lichtbogens muss die Spannung erhöht werden [12].

### 3.2.1.5 Unterpulver-Doppeldrahtschweißen

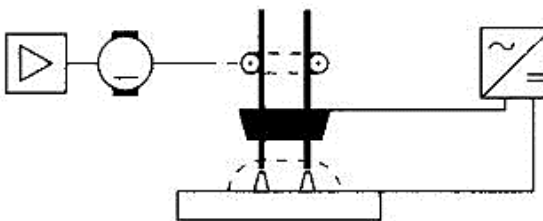


Abbildung 8 - UP-Doppeldraht- oder Parallelschweißen (schematisch) [7]

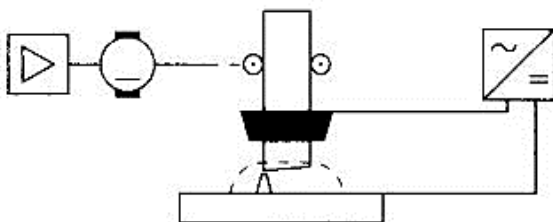
Dieses Verfahren wird auch als Paralleldrahtschweißen bezeichnet. Bei diesem Verfahren wird mit zwei zueinander parallel stehenden Drähten gearbeitet. Diese beiden Drähte weisen oft einen geringeren Durchmesser auf als eine Drahtelektrode, die zum Einzeldrahtschweißen verwendet wird und haben einen Abstand von 4 ... 8 mm untereinander. Charakteristisch für dieses Verfahren ist der gemeinsame Lichtbogen, in dem beide Elektroden abschmelzen.

Gekennzeichnet ist das UP-Doppeldrahtschweißen durch:

- zwei Drahtelektroden,
- eine Schweißstromquelle und
- eine Prozessregelung.

Die Abschmelzleistung ist, bedingt durch den Einsatz von zwei Elektroden, höher als bei der Eindrahtvariante, während das Einbrandverhältnis geringer ist. Werden zwei hintereinanderliegende Elektroden verwendet, verlängert sich durch die Positionierung das Schmelzbad. Dies wirkt sich wiederum positiv auf die Schweißgeschwindigkeit aus, da die Schmelze langsamer erstarrt und besser ausgasen kann. Dadurch sinkt bei höheren Schweißgeschwindigkeiten die Porenanfälligkeit. Bei zwei nebeneinander stehenden Drahtelektroden verbessert sich durch den breiteren Lichtbogen die Spaltüberbrückbarkeit. Des Weiteren werden bei dieser Anordnung die Nahtflanken besser erreicht. Auf Grund des größeren Lichtbogens nimmt die Intensität und damit auch die Einschweißtiefe ab. Werden dünnere Bleche verschweißt, sinkt durch zwei nebeneinander gestellte Elektroden die Gefahr des Durchfallens des Schmelzbades [11] [12].

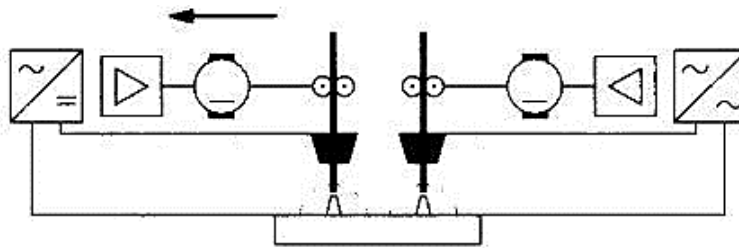
### 3.2.1.6 Unterpulver-Bandschweißen



**Abbildung 9 - UP-Bandschweißen (schematisch) [12]**

Das UP-Bandschweißen wird wie das Unterpulver-Eindrahtschweißen durchgeführt, nur dass bei diesem Verfahren anstelle des Drahtes ein Band aus Schweißzusatzwerkstoff verwendet wird. Das Pulver wird, um eine gleichmäßige Bedeckung der Schweißstelle zu gewährleisten, vor und hinter dem Band zugeführt. In erster Linie lassen sich mit dem UP-Bandschweißverfahren Auftragschweißungen (z.B.: Plattieren mit hochlegierten Werkstoffen) durchführen, da hierbei die komplette Breite des Bandes genutzt werden kann. Auch lassen sich in dieser Position größere Spalte problemlos mit einem relativ geringen Einbrand überbrücken. Der geringe Einbrand wird durch das Brennen eines über das Band wandernden Lichtbogens verursacht. Dadurch sind, bedingt durch die geringe Aufmischung des Zusatzwerkstoffes mit dem Grundwerkstoff, Schichtstärken von 3,5 ... 5 mm beim Plattieren möglich. Verbindungsschweißungen werden mit einem um 90 ° gedrehten Band durchgeführt. Bei dieser Anordnung erzielt man ähnliche Effekte wie beim UP-Doppeldrahtschweißen, d.h. Erzeugung längerer Schmelzbäder und Umsetzung höherer Schweißgeschwindigkeiten [12].

### 3.2.1.7 Unterpulver-Tandemschweißen



**Abbildung 10 - UP-Tandemschweißen (schematisch) [12]**

Eine weitere Steigerung der Abschmelzleistung lässt sich mit dem UP-Tandemschweißen erreichen. Bei diesem Verfahren wird mit 2 oder 3, in Sonderfällen auch mit bis zu 6 Drahtelektroden, die hintereinander angeordnet sind, geschweißt. Dabei liegen die Abstände der Elektroden zwischen 15 ... 100 mm. Diese Abstände beeinflussen das Abbrennen der Elektroden. Liegen sie dicht beieinander, brennen alle Drahtelektroden in einer Kaverne. Werden die Abstände vergrößert, brennt jede Elektrode für sich in einer Kaverne ab. Das UP-Tandemschweißen wird oft auch als UP-Mehrdrahtschweißen bezeichnet und ist gekennzeichnet durch

- mehrere Drahtelektroden,
- eine Stromquelle je Drahtelektrode und
- eine Prozessregelung je Drahtelektrode.

Durch die Verwendung mehrerer Prozessregelungen und Stromquellen hat das Verfahren einige bedeutende Vorteile gegenüber den anderen UP-Varianten. Während die erste Drahtelektrode mit einem hohen Schweißstrom geschweißt wird und damit in die Tiefe der Naht vordringt, füllen die restlichen Elektroden mit geringeren Schweißströmen die Naht systematisch auf. Dabei sollte von der ersten bis zur letzten Elektrode der Schweißstrom sinken und die Schweißspannung steigen. Das Ergebnis ist eine breite und glatte Nahtoberfläche. Einer der wesentlichen Vorteile dieser Variante ist, dass der Nahtformfaktor (Verhältnis Nahthöhe zur Nahtbreite) sehr günstig ist. Günstige Nahtformfaktoren wirken Erstarrungsrissen entgegen. Durch die hohe Abschmelzleistung infolge der Elektrodenanordnung sind sehr hohe Schweißgeschwindigkeiten möglich. Allerdings gibt es auch Grenzen: Die erreichten Schweißgeschwindigkeiten hängen maßgeblich von den Schnellschweiß Eigenschaften der Schweißpulver ab. Auch die gegenseitige magnetische Beeinflussung der von Strom durchflossenen Elektroden kann sich nachteilig auf das Schweißergebnis auswirken. Um dem entgegenzuwirken, wird die erste Drahtelektrode häufig mit Gleichstrom betrieben, während alle anderen Elektroden an Wechselstromquellen angeschlossen werden [12] [11].

### 3.2.2 Lichtbogenzündung

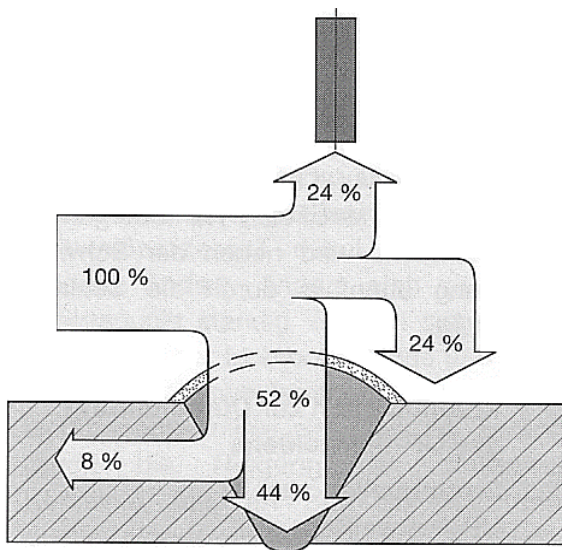
Die Zündung des Lichtbogens kann durch einen Kurzschluss zwischen Drahtelektrode und Werkstückoberfläche erfolgen. Bevor die Drahtelektrode auf den Werkstoff trifft, durchfährt sie im Schleichgang das Schweißpulver. Dies ist notwendig, um Beschädigungen an Drahtelektrode und Drahtfördersystem beim zu schnellen Auftreffen des Drahtes auf das Werkstück zu vermeiden und wird in der Praxis häufig bei dünnen Drahtelektroden angewendet. Der Schleichgang ist je nach Hersteller einstellbar und beträgt meist wenige Millimeter pro Minute. Nachdem der Draht das Pulver durchquert hat, „kratzt“ das mit Plus- oder Minuspolung versehene Ende der Elektrode über die metallische Oberfläche. Damit die Stromdichte beim Zündvorgang entsprechend hoch ist, muss die effektive Kontaktfläche möglichst klein sein. Durch den Kurzschluss an der Kontaktstelle kommt es zu punktueller Erwärmung bis über die Siedetemperatur, das Metall verdampft. Durch die leichte Ionisierbarkeit von Metaldämpfen wird an der Katode eine Elektronenemission bewirkt, die eine große Bedeutung für den Zündprozess hat. Unmittelbar vor der Katode entsteht eine positive und vor der Anode eine negative Raumladung. Durch diese Raumladung kommt es zur Entstehung von Ladungsträgern aus den Metaldämpfen, welche ein Zünden des Lichtbogens bewirken. Wichtig für das Aufrechterhalten des Lichtbogens ist die so genannte thermische Ionisation, die an Stoßvorgänge gebunden ist. Bei diesen Stoßvorgängen entstehen Ladungsträger aus stufenweise angeregten Atomen. Innerhalb der Lichtbogensäule findet in Richtung der Anode eine Beschleunigung der Elektroden statt, bei deren Aufprall es auf der Metalloberfläche zu einer Erwärmung kommt. Zwischen Anode und Katode entsteht während der Brenndauer des Lichtbogens ein Temperaturunterschied. Die Temperatur der Katode liegt unterhalb der Temperatur der Anode, da der Katode durch die Elektronenemission Energie entzogen wird. Wird mit Wechselstrom geschweißt, erlischt der Lichtbogen bei jedem Nulldurchgang der Spannung. In der Lichtbogenatmosphäre muss dann eine ausreichende Menge an Ladungsträgern, welche für das Neuzünden des Lichtbogens nach dem Nulldurchgang erforderlich sind, vorhanden sein. Da innerhalb der Kaverne Metaldämpfe und ionisierte Gase eingeschlossen sind, ist das Vorhandensein von Ladungsträgern beim Unterpulverschweißen sichergestellt.

Bei dieser Art der Kurzschlusszündung kann es vorkommen, dass sich beim Auftreffen der Elektrode auf das Werkstück Pulverteilchen zwischen den Kontaktflächen befinden, da beim Unterpulverschweißen die Lichtbogenzündung unter der Pulverabdeckung stattfindet. Das führt dazu, dass im ungünstigsten Fall die eingeklemmten Pulverteilchen einen Kurzschluss verhindern. Um dies zu umgehen, bedient man sich in der Praxis anderer Zündmethoden. Eine Möglichkeit besteht darin, dass die Elektrode im stromlosen Zustand auf das Werkstück aufgesetzt wird. Nach dem Aufsetzen wird dann die Pulverzufuhr eingeschaltet. Ist ausreichend Pulver an der Schweißstelle werden Schweißstrom und Drahtvorschub (im Schleichgang) eingeschaltet und es kommt zum Kurzschluss. Nach erfolgreicher Zündung des Lichtbogens wird die Drahtzufuhr auf eingestellte Parameterwerte angehoben und der Schweißprozess beginnt. Bei einer anderen Variante der Kurzschlusszündung kommt Eisenpulver oder Stahlwolle zum Einsatz. Diese Zusätze werden

zwischen Elektrode und Werkstück eingebracht, bevor die Pulverzufuhr gestartet und der Schweißstrom eingeschaltet wird. Nach dem Einschalten des Schweißstromes verdampfen das Pulver oder die Wolle infolge der Erwärmung und zünden somit den Lichtbogen. Diese Methode der Kurzschlusszündung wird vor allem bei dicken Drähten angewendet.

Ähnlich wie beim Wolfram-Inertgas-Schweißverfahren kann beim Unterpulverschweißen die Zündung des Lichtbogens auch über eine hochfrequente Spannung erfolgen. Die Drahtelektrode wird bei eingeschalteter Schweißstromquelle im Schleichgang durch das Pulver geführt. Da jetzt an der Drahtelektrode eine Leerlaufspannung anliegt, wird bei einem entsprechend geringen Abstand zwischen Elektrode und Werkstück die Feldstärke der hochfrequenten Spannungsimpulse so hoch, dass es zu einer Entladung und somit zur Lichtbogenzündung kommt. Dieser Zündungsart ist einerseits effektiv, andererseits können elektronische Baugruppen inner- und außerhalb der Schweißanlage nachteilig durch die Hochfrequenz beeinflusst und müssen entsprechend geschützt werden. Des Weiteren kann es zu einer negativen Beeinträchtigung elektronisch gesteuerter Maschinen und/oder Funk- und EDV-Anlagen kommen. Aus Sicht des Arbeitsschutzes ist es zwar nicht gefährlich, aber dennoch unangenehm, wenn Bauteile mit dieser Spannung berührt werden [7] [12] [11].

### 3.2.3 Wärmebilanz



**Abbildung 11 - Wärmebilanz beim UP-Schweißen [12]**

Abbildung 11 zeigt die Wärmebilanz beim Unterpulverschweißen. Jeweils 24 % der zugeführten Energie werden zum Aufschmelzen der Drahtelektrode und des Schweißpulvers benötigt. Von den in den Grundwerkstoff abgeleiteten 52 % werden 44 % für dessen Aufschmelzen verbraucht. Die verbleibenden 8 % der Energie werden in den Grundwerkstoff als Wärmeverlust abgeleitet. Das Unterpulverschweißen hat einen thermischen Wirkungsgrad von etwa 85 % ... 95 % [11] [12].

### 3.2.4 Schlacke

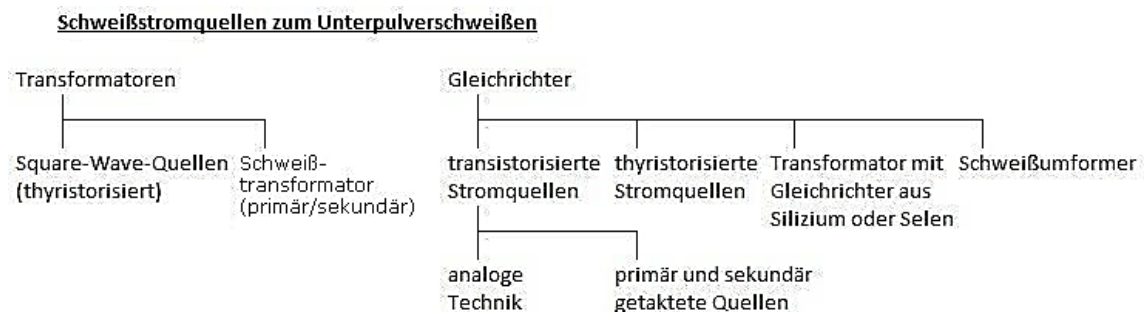
Die Güte der Schweißnaht wird entscheidend von der Schlacke beeinflusst. Im Ur- oder Lieferzustand ist das Schweißpulver nicht elektrisch leitend. Durch den Lichtbogenprozess wird das Pulver geschmolzen und es entsteht Schlacke, welche durch Dissoziation und Ionisation zum elektrischen Leiter wird. Durch diese elektrische Leitfähigkeit fließt der Schweißstrom anteilig über Nebenschluss durch die Schlacke, welche dabei überhitzt wird. Der Grad der Überhitzung hat Einfluss auf die Viskosität der Schlacke und auch auf die Strombelastbarkeit des Schweißpulvers, von der wiederum die maximale Schweißgeschwindigkeit abhängt.

Die Schlacke beeinflusst weiterhin die mechanischen Eigenschaften, die chemische Zusammensetzung und die Riss- und Porenanfälligkeit des Schweißgutes. Die geringere Dichte der Schlacke sorgt dafür, dass sie auf dem Schmelzbad schwimmt und dadurch die schädlichen Einflüsse der Atmosphäre von der flüssigen Schmelze fernhält. Durch die vollständige Abdeckung der Schmelze und des angrenzenden Grundwerkstoffes mit Schlacke wird das äußere Erscheinungsbild der Naht geprägt. Nahtränder werden er-

wärmt und aufgeschmolzen. So ist die Bildung eines nahezu kerbfreien Nahtübergangs möglich [12].

### 3.2.5 Stromquellen für das Unterpulverschweißen

Das Unterpulverschweißen zählt zu den Hochleistungsschweißverfahren. Dies wird deutlich, wenn ein Vergleich zu anderen Lichtbogenschweißverfahren wie Lichtbogenhand- oder Metallschutzgasschweißen in Bezug auf die Abschmelzleistung und Einschaltdauer vorgenommen wird. Schweißstromquellen, die für das UP-Schweißverfahren vorgesehen sind, müssen die technischen Voraussetzungen für eine hundertprozentige Einschaltdauer erfüllen. Wurde in den Anfangszeiten des UP-Schweißens noch vorrangig mit Wechselstrom gearbeitet, kommt mit den heute überwiegend eingesetzten Gleichrichtern Gleichstrom zum Einsatz. Üblicherweise wird der Pluspol an die Elektrode gelegt, um einen möglichst tiefen Einbrand zu erreichen. Im Gegensatz dazu wird beim Auftragschweißen auf Grund des geringeren Einbrandes die Elektrode negativ gepolt. Wechselstrom wird hauptsächlich bei Unterpulverschweißvarianten mit mehr als einer Drahtelektrode, also beim Tandem- bzw. Mehrdrahtschweißen eingesetzt. Die erste Elektrode wird mit Gleichstrom und alle nachfolgenden mit Wechselstrom verschweißt, um die magnetische Beeinflussung der Lichtbögen untereinander zu minimieren. Die beim UP-Schweißen verwendeten Geräte weisen fallende oder horizontal schwach fallende Kennlinie auf. Nachstehende Grafik (Abbildung 12) zeigt eine Übersicht der am Markt erhältlichen Typen von Schweißstromquellen.



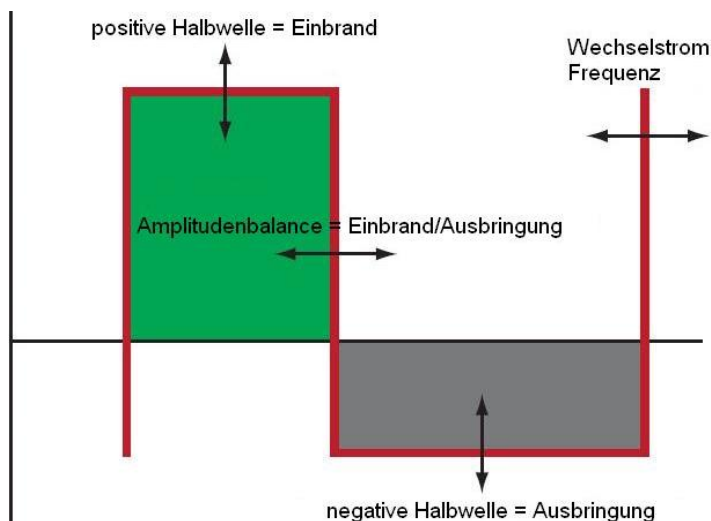
**Abbildung 12 - Einteilung der Schweißstromquellen zum UP-Schweißen nach [13]**

Die Schweißumformer zählen mit zu den ältesten Stromquellen, die heute noch im Einsatz sind. Transformatoren mit Silizium- oder Selengleichrichtern wurden später entwickelt. Die Umformer und die Transformatoren werden häufig auch als konventionelle Stromquellentypen bezeichnet. Im Zuge der Weiterentwicklung wurden thyristorisierte Stromquellen entwickelt. Diese Geräte wiesen, im Gegensatz zu den konventionellen Stromquellen, beim erzeugten Gleichstrom eine deutlich geringere Oberwelligkeit auf. Auch lieferten die elektronischen Stromquellen einen Strom hoher Güte, der unabhängig von Netzschwankungen war. Das war ein bedeutender Fortschritt, da kleinste Unregel-



mäßigkeiten im Strom, hervorgerufen durch Schwankungen im Netz, bereits zu gravierenden Fehlern in der Schweißnaht führen können. Steht der Leichtbau im Vordergrund, wird oft auf transistorisierte Stromquellen zurückgegriffen. Diese können kleiner dimensioniert werden. Primär und sekundär getaktete transistorisierte Stromquellen weisen eine gewisse Oberwelligkeit, die sich bei anspruchsvollen Schweißarbeiten nachteilig auf das Ergebnis auswirken kann. Dies ist einer der Aspekte, warum man bei Schweißaufgaben mit sehr hohen Ansprüchen oftmals auf die analoge Technik zurückgreift. Nachteilig sind hierbei allerdings die hohe Verlustleistung und der relativ hohe Preis in der Herstellung. Moderne Schweißstromquellen liefern derzeit einen Schweißstrom von etwa 630 ... 1600 A zum UP-Eindrahtschweißen. Sie alle verfügen über eine Einschaltdauer von 100 %, d.h. mit diesen Geräten ist man in der Lage, lange Schweißnähte zu produzieren. Die Einschaltdauer bezieht sich auf ein Intervall von 10 Minuten, in denen mit voller Leistung geschweißt wird. Der Wert in Prozent gibt an, nach welcher Zeit eine Ruhephase zu erfolgen hat (Beispiel: Schweißstrom 1000 A, Einschaltdauer = 45 % → d.h. 4,5 Minuten Schweißen mit 1000 A, danach 5,5 Minuten Ruhephase zum Abkühlen oder zum Vermeiden von Beschädigungen).

Inverterstromtechnik ermöglicht eine Verschiebung der Zeit- und Amplitudenbalancen zur Beeinflussung des Einbrandes und der Abschmelzleistung (Abbildung 13). So können im Gegensatz zur „normalen“ 50 %-Verteilung der positiven und negativen Halbwelle (Abbildung 14 b) bei einer Intervallverschiebung (Abbildung 14 c → 25 % Pluspolung) eine Verringerung des Einbrandes und eine Steigerung der Abschmelzleistung erreicht werden.



Ebenfalls großen Einfluss auf den gesamten Schweißprozess hat die Übertragung des Schweißstromes auf das Werkstück. So muss man darauf achten, die magnetische Blaswirkung entweder ganz und gar zu vermeiden oder, falls sich dies technisch nicht realisieren lässt, wenigstens zu dämpfen. Grundsätzlich sollte eine zusätzliche (meist ungewollte) Verstärkung der Blaswirkung vermieden werden. Das kann der Schweißer im Prozess allein schon durch fachgerechtes Anschließen von Anode und Katode erreichen. Auf den Schweißdraht sollte der Strom so übertragen werden, dass die Länge der stromdurchflossenen Elektrode so gering wie möglich zu halten ist. Nur so ist eine verlustarme Übertragung der hohen Schweißströme gewährleistet. Die Stromzuführung auf den Draht kann unterschiedlich erfolgen. Bewährt hat sich, ähnlich dem MSG-Schweißen, eine Stromkontaktdüse, die etwas größer als der eigentliche Drahtdurchmesser ist. Der Strom wird hierbei an den Stellen übertragen, die durch die Biegung des Drahtes an der Düse anliegen. Bei größeren Drahtdurchmessern können auch Kontaktplatten verwendet werden, die mittels Federkraft an den Draht gedrückt werden. Der Stromübergang erfolgt hier sehr kontrolliert. Der Anpressdruck der Kontaktplatte darf nicht zu hoch eingestellt, da sonst der Drahtvorschub behindert wird. Auch muss ein bestimmter Abstand zum Lichtbogen eingehalten werden, da hohe Temperaturen einen vorzeitigen Verschleiß der Düse nach sich ziehen [7] [12] [13] [14].

### 3.2.6 Regelung der Lichtbogenlänge

Auch beim Unterpulverschweißen wird die Lichtbogenlänge geregelt, da der Schweißprozess nur als stabil anzusehen ist, wenn die Geschwindigkeit der Zuführung der Drahtelektrode gleich der Geschwindigkeit des Abschmelzens der Elektrode ist. Verläuft der Abschmelzvorgang zu schnell, wird der Lichtbogen länger und reißt unter Umständen ab. Schmilzt die Elektrode zu langsam ab, wird der Lichtbogen immer kleiner. Im ungünstigsten Fall stößt die Elektrode auf den Werkstoff und gelangt somit in das Schmelzbad. Unzulässige Unregelmäßigkeiten wären die Folge. Um eine Stabilität des Schweißprozesses zu gewährleisten, kommt die „innere“ oder die „äußere“ Regelung zur Anwendung. Die Art der Regelung ist abhängig vom Drahtdurchmesser und nicht zuletzt vom Hersteller der Stromquelle.

Üblicherweise wird ab einem Drahtdurchmesser größer 3 mm die äußere Regelung angewendet. Die Stromquelle verfügt in diesem Fall über eine fallende Kennlinie. Die Regelung erfolgt über den Drahtvorschub. Eine Änderung der Lichtbogenlänge bewirkt eine Änderung des Spannungsabfalls über den Lichtbogen, d.h. eine Verringerung der Schweißspannung. Diese wird messtechnisch erfasst und mit dem eingestellten Sollwert verglichen. Auf Basis dieses Vergleichs wird über einen elektronischen Regler der Vorschubmotor angesteuert: Wird der Lichtbogen kleiner, ist die Drahtfördergeschwindigkeit zu hoch und muss verringert werden. Umgekehrt verhält es sich, wenn der Lichtbogen

länger wird. Über den Regler wird die Drahtfördergeschwindigkeit so lange erhöht, bis sich der Prozess wieder auf die normalen Parameter eingepegelt hat.

Bei Drahtdurchmessern kleiner 3 mm wird die innere Regelung angewendet. Die Stromquellen verfügen über eine horizontale bzw. schwach fallende Kennlinie. Die äußere Regelung reagiert zu träge, dies würde sich negativ auf das Schweißergebnis auswirken. Bei der inneren Regelung ist die Drahtfördergeschwindigkeit über den gesamten Prozesszeitraum konstant. Die Lichtbogenlänge wird über den Schweißstrom geregelt: Wird der Lichtbogen durch eine Unregelmäßigkeit in der Nahtgeometrie (z.B.: ein Absatz) kleiner, verschiebt sich der Arbeitspunkt und der Schweißstrom wird größer. Durch den konstanten Drahtvorschub wird nun mehr Zusatzwerkstoff abgeschmolzen und zwar so lange, bis sich die Länge des Lichtbogens vergrößert und dadurch der Schweißstrom wieder auf das eingestellte Niveau zurückfällt [7] [12] [13].

### 3.2.7 Zusatz- und Hilfswerkstoffe

Den Zusatz- und Hilfswerkstoffen kommt beim Schweißen generell eine große Bedeutung zu. Sie beeinflussen maßgeblich die mechanisch-technologischen Eigenschaften der Schweißnaht. Die hauptsächlichen Bestandteile des Schweißgutes werden über Draht- oder Banelektroden in das Schmelzbad eingebracht. Weitere Legierungsbestandteile gelangen über mineralische Komponenten des Schweißpulvers in die Schweißnaht.

Durch den Schweißprozess können Legierungsbestandteile aus Schweißdraht und Grundwerkstoff zu- bzw. abbrennen. Die DIN 1910-11 definiert Ab- und Zubrand wie folgt [15]:

- „Abbrand (Abbrandverlust) - Unterschied zwischen dem höheren Legierungsgehalt des Schweißzusatzwerkstoffes vor dem Schweißen und dem niedrigeren des reinen Schweißgutes bzw. negative Differenz zwischen tatsächlicher und theoretischer Schweißgutzusammensetzung.
- Zubrand (Zubrandgewinn) - Unterschied zwischen dem niedrigeren Legierungsgehalt des Schweißzusatzwerkstoffes vor dem Schweißen und dem höheren des reinen Schweißgutes bzw. positive Differenz zwischen tatsächlicher und theoretischer Schweißgutzusammensetzung.“

Zu- und Abbrand treten bei jedem Schmelzschweißverfahren auf, bei dem mit Zusatz- und Hilfswerkstoffen gearbeitet wird.

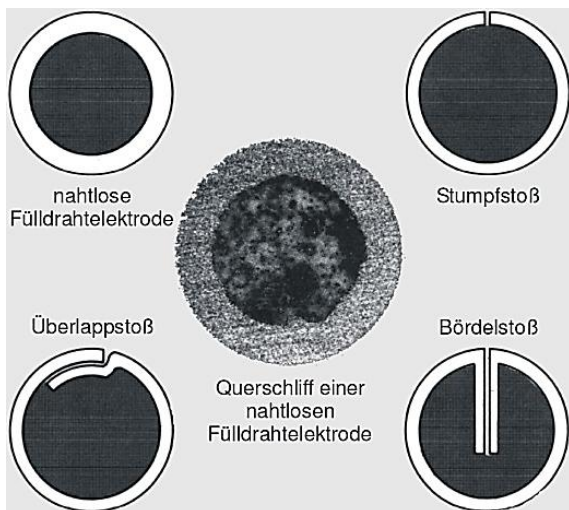
### **3.2.7.1 Draht- und Bandedelektroden**

Bei den Drahtelektroden wird zwischen Massiv- und Fülldrähten unterschieden. Welche Drahtsorte zum Einsatz kommt, hängt von der Art der Schweißaufgabe (Verbindungs- oder Auftragschweißen) und von den zu verschweißenden Werkstoffen ab. Aus Walzdraht kalt gezogene Massivdrähte werden überwiegend zum Verbindungsschweißen eingesetzt, während Fülldrähte ihre herausragenden Eigenschaften beim Auftragschweißen geltend machen können. Mit ihnen ist es möglich, Verschleißschichten aus extrem harten und hochlegierten Werkstoffen herzustellen. Die Legierungselemente der Fülldrähte sind im Pulver enthalten, welches in einem Draht aus unlegiertem Stahl eingeschlossen ist. Mangan ist eines der Hauptlegierungselemente von Draht- oder Bandedelektroden. Als weitere Legierungselemente können Silicium, Molybdän oder Nickel den Massiv- oder auch Fülldrahtelektroden beigemischt sein. Silicium beispielsweise erhöht die Sicherheit gegen Porenbildung im Schweißgut, während Nickel und Molybdän die mechanischen Gütewerte erhöhen. Molybdän für sich allein als Legierungszusatz verbessert die Heißrissicherheit und kann zum Schweißen von Feinkornbaustählen und Stählen mit erhöhtem Kohlenstoffgehalt verwendet werden. Werden Drahtelektroden mit erhöhtem Nickelgehalt verschweißt, verbessert sich bei Feinkornbaustählen die Kaltzähigkeit. Hochfeste Stähle werden mit Drahtelektroden verschweißt, denen geringe Mengen an Nickel, Molybdän und teilweise Chrom zulegiert worden sind. Dies führt zu einer Verbesserung der Kaltzähigkeit und der Festigkeitswerte.

Fülldrähte gibt es in mehreren Varianten. Entweder sind sie nahtlos oder formgeschlossen (Abbildung 15). Sie sind grob vergleichbar mit den bekannten Stabelektroden, welche beim Lichtbogenhandschweißen verwendet werden. Unterschied hierbei ist nur, dass es sich bei Fülldrähten um „umgedrehte“ Stabelektroden handelt, bei denen das Pulver mit Legierungselementen und Zusätzen zur Lichtbogenstabilisierung vom eigentlichen Schweißdraht ummantelt wird.

Bei nahtlosen Fülldrähten ist das Füllmaterial vor atmosphärischen Feuchtigkeit geschützt. Ein weiterer Vorteil ist, dass bei diesen Drähten auch bei längerer Lagerung keine Rücktrocknung erforderlich ist. Der diffusible Wasserstoffgehalt bei nahtlosen Fülldrähten beträgt weniger als 5 ml/100g.

Bei formgeschlossenen Fülldrähten könnte es bei ungünstiger Lagerung über den Formspalt zu einem Eindringen von Feuchtigkeit kommen. Das könnte dazu führen, dass Wasserstoff unkontrolliert in das Schmelzbad gelangt und dadurch die Kaltrissneigung des Schweißguts zunimmt [7] [12] [5].



**Abbildung 15 - Querschnittformen von Fülldrahtelektroden [16]**

### **3.2.7.2 Schweißpulver**

Wurden in den Anfangszeiten des Unterpulverschweißens noch einfache Glaspulver verwendet, die keinen Einfluss auf die metallurgischen Eigenschaften ausübten [3] [12], so tragen die heutigen Schweißpulver wesentlich zur Gestaltung und Beschaffenheit der Schweißnaht bei. Schweißpulver der heutigen Zeit bestehen aus Kalk, Quarz, Rutil, Bauxit, Magnesit, Schamotte, Ton und Flussspat. Das Schweißpulver schützt den in der Kaverne brennenden Lichtbogen, den in das Schweißgut übergehenden Elektrodenwerkstoff und das Schmelzbad vor den Einflüssen der Atmosphäre. Weiterhin trägt das Pulver zur Verbesserung der Lichtbogenzündung und, durch die Bildung von Ladungsträgern, zur Stabilisierung der Lichtbogensäule bei. Das erhitzte geschmolzene Pulver bildet eine Schlacke, die sich im Laufe des Schweißprozesses zu einer Kaverne aufbläht. Innerhalb der Kaverne findet eine gezielte metallurgische Beeinflussung des Schweißgutes statt. Die Schweißraupe wird durch die erstarrende Schlacke geformt. Dabei ist die Nahtoberfläche stark von der verwendeten Korngröße abhängig. Je feiner die Körnung des verwendeten Schweißpulvers ist, desto glatter und breiter wird die Nahtoberfläche. Gebräuchlich sind Korngrößen zwischen 0,2 ... 1,6 mm.

Damit dem bei der Verbrennung entstehenden Gas das Entweichen durch das Pulver ermöglicht wird, darf eine maximale Schütthöhe nicht überschritten werden. Wird die Höhe überschritten, kann eine raue Nahtoberfläche die Folge sein. Bei Unterschreitung der minimalen Schütthöhe besteht die Möglichkeit, dass der Lichtbogen durchschlägt und die Nahtoberfläche porös wird. Die Schütthöhe wird über den Abstand und die Form der Pulverschüttdüse bestimmt.

Eine weitere Einteilung der Schweißpulver erfolgt nach der Art der Herstellung. Es wird zwischen agglomerierten und erschmolzenen Pulvern unterschieden. Als dritte Herstellungsart kann an dieser Stelle das Sintern genannt werden. Sinterpulver bestehen aus feingemahlenen Komponenten und werden mit Zusatz von Ton unter hohem Druck zu

Rohlingen gepresst, die anschließend bei Temperaturen kurz unterhalb des Schmelzpunktes gesintert werden. Danach werden die Presslinge gebrochen, gemahlen und auf die entsprechende Korngröße gebracht. Allerdings ist die Verwendung von Sinterpulvern in Mitteleuropa nicht üblich [16].

Agglomerierte Pulver (Abbildung 16 a) setzen sich mittels eines Verbindungsverfahrens aus einzelnen Bestandteilen zusammen. Die eingesetzten Rohstoffe werden gegläht und danach zu Pulvern mit einer Korngröße von weniger als 1 mm Durchmesser gemahlen. Nach dem Mahlprozess werden die Pulver für den weiteren Herstellungsprozess in Silos eingelagert. Die Mischung der einzelnen Bestandteile erfolgt trocken nach einer bestimmten Rezeptur. Als Bindemittel wird dem Trockenpulver Wasserglas hinzugegeben und anschließend über einen rotierenden Granulierteller dem Trocknungsprozess zugeführt. Durch die Rotation des Tellers bilden sich aus den Pulverpartikeln kleine Kugeln. Während des Trocknungsprozesses bindet das Wasserglas ab. Danach wird das getrocknete Pulver in einen Glühofen verbracht und auf ca. 600 ... 900 °C erwärmt. Durch diese Wärmebehandlung erhält das Pulver seine Festigkeit und wird nach dem Abkühlen gesiebt und in die vom jeweiligen Hersteller bevorzugten Gebinde abgefüllt.

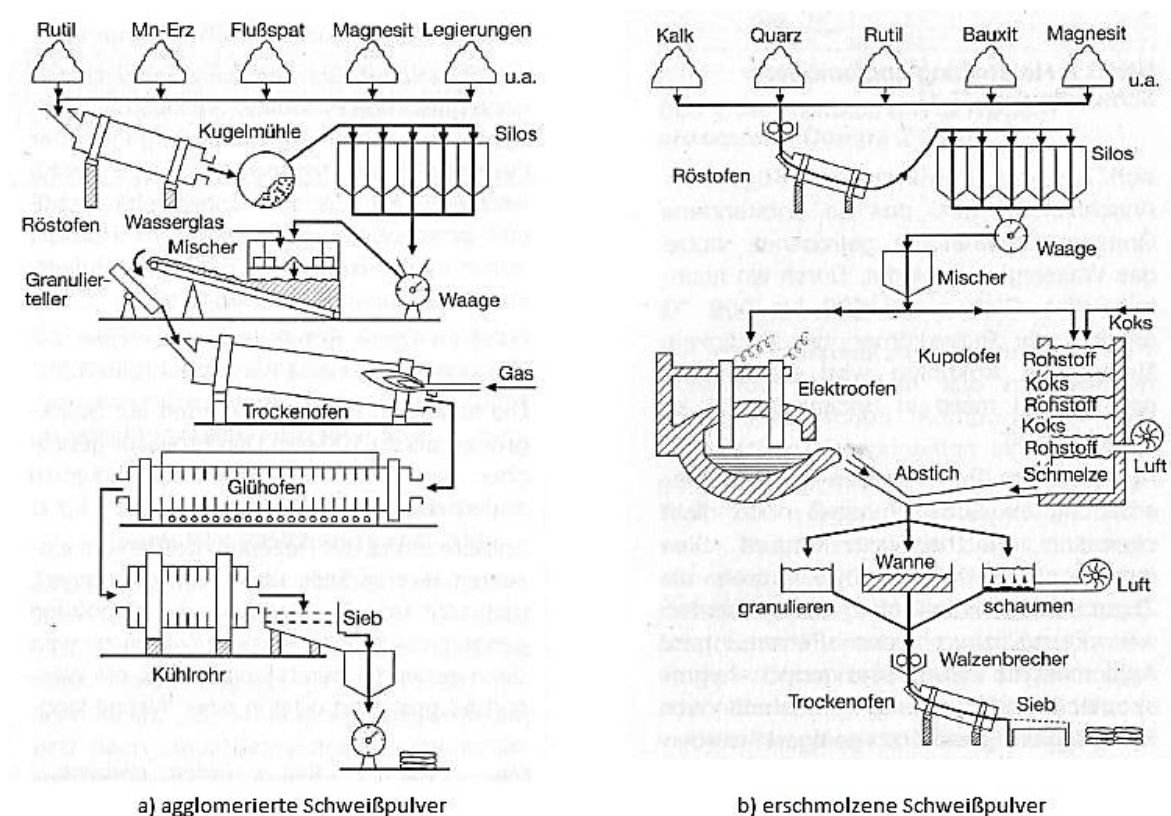


Abbildung 16 - Schematische Darstellung der Herstellung von Schweißpulvern [12]

Agglomerierte Pulver reagieren hygroskopisch. Das bedeutet, sie müssen vor Feuchtigkeitsaufnahme geschützt werden und sind vor dem Gebrauch gegebenenfalls rückzutrocknen. Die Inhaltsstoffe dieser Pulver haben vor der schweißtechnischen Verarbeitung noch nicht chemisch und thermisch miteinander reagiert. Somit können metallischer Komponenten (z.B.: Ferromangan oder Ferrosilicium) dem Pulver beigemischt werden. Der Verbrauch hängt von der Schüttdichte (agglomerierte Pulver: etwa 1,2 kg/dm<sup>3</sup> [Quelle: ESAB GmbH]) ab. Dieser Wert kann zwischen einzelnen Herstellern schwanken [12] [17] [9].

Erschmolzene Schweißpulver (Abbildung 16 b) sind homogene glasartige Produkte, die eine amorphe Masse mit kristallinem Charakter bilden. Die Rohstoffe werden in einem Elektroofen bei Temperaturen von 1250 ... 1500 °C ähnlich wie bei der Glasherstellung geschmolzen. Die Schmelze zerspringt, durch das Wirken von Abkühlspannungen, in größere Brocken. Dieser Vorgang kann beschleunigt werden durch das Einleiten der Schmelze in Wasser oder das Schäumen mittels eingblasener Luft. Die erzeugten Brocken werden in einem Walzenbrecher zerkleinert, getrocknet und auf die erforderliche Korngröße abgesiebt. Danach werden die erschmolzenen Pulver ähnlich wie bei den agglomerierten Pulvern in die vom Hersteller bevorzugten Gebinde abgefüllt. Sie sind unempfindlich gegenüber Feuchtigkeit, besitzen eine hohe Kornfestigkeit und eine höhere spezifische Dichte als agglomerierte Pulver. Daher steigt die Schüttdichte im Vergleich zu den agglomerierten Pulvern um 0,4 kg/dm<sup>3</sup> auf 1,6 kg/dm<sup>3</sup> [Quelle: ESAB GmbH], der Pulververbrauch im Schweißprozess steigt [12].

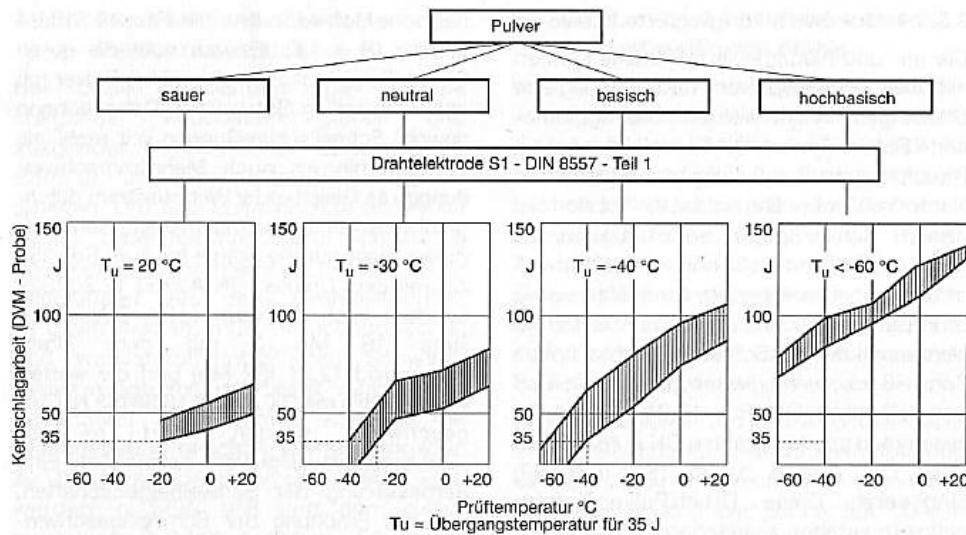
Eine dritte Möglichkeit der Einteilung von Schweißpulvern, besteht darin, sie nach dem Basizitätsgrad zu ordnen. Der Basizitätsgrad nach Boniczewski (Gleichung 1) gibt an, in welchem Verhältnis saure und basische Bestandteile in dem Schweißpulver vorkommen:

$$B = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{BaO} + \text{CaF}_2 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + 0,5(\text{FeO} + \text{MnO})}{\text{SiO}_2 + 0,5(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2)} \quad (\text{Gleichung 1})$$

Zu vergleichen ist der Basizitätsgrad mit der Einteilung der Stabelektroden (sauer, basisch, rutil) beim Lichtbogenhandschweißen. Die Einstellung des Basizitätsgrades erfolgt über die Hauptbestandteile des Pulvers. Die Summe der basisch wirkenden Bestandteile wird durch die Summe der sauer wirkenden dividiert und gibt als Ergebnis nach Gleichung 1 eine dimensionslose Zahl aus, welche das Verhältnis der Bestandteile beschreibt:

B < 1	B ~ 1	B > 1	B > 3 bzw. B >> 1
sauer	neutral	basisch	hochbasisch

Welche Auswirkungen der Basizitätsgrad auf die Kerbschlagzähigkeit der Schweißnaht hat, zeigt Abbildung 17:



**Abbildung 17 - Einfluss der Pulverzusammensetzung auf die Kerbschlagzähigkeit des Schweißgutes [12]**

Schweißnähte von dünnwandigen Blechen, wie z.B.: Kehlnähte bei Propangasflaschen, werden bevorzugt mit sauren oder neutralen Pulvern verschweißt. Die Schlacken, die bei Verwendung dieser Pulver entstehen, haben niedrigere Schmelzbereiche als die zu verschweißenden Metalle. Dieser Umstand begünstigt in hohem Maße die Schlackenlöslichkeit. Zu den sauren und/oder neutralen Pulvertypen gehören MS; CS; AR und AB.

Die Schlacken basischer oder mittelbasischer Schweißpulver besitzen Erstarrungstemperaturen, die annähernd gleich oder etwas höher als die der zu verschweißenden Metalle sind. Sie weisen nach Anwendung der Gleichung von Boniczewski einen Basizitätsgrad von 1,2 ... 2 auf. Diese Schweißpulver begünstigen die Kerbschlagzähigkeit der Schweißverbindungen für Einsatztemperaturen bis – 40°C. Es kann bei Ein- oder Mehrdrahtanwendungen in Verbindung mit geeigneten Drahtelektroden und sachgerechter Rücktrocknung der Schweißpulver ein relativ niedriger diffusibler Wasserstoffgehalt in der Schweißnaht erreicht werden.

Sollen Schweißverbindungen mit sehr hoher Zähigkeit im Tieftemperaturbereich hergestellt werden, kommen hochbasische Schweißpulver zum Einsatz. Mit geeigneten Drahtelektroden können hier geforderte Kerbschlagzähigkeiten bis zu einer Temperatur von – 80°C erreicht werden [9]. Der Schweißprozess mit hochbasischen Pulvern kann, unter Beachtung der geltenden technischen Regeln, als rissicher angesehen werden.

In der Norm DIN EN ISO 14174 wird eine Einteilung der Schweißpulver nach der Herstellungsart, den Hauptbestandteilen (Tabelle 3) und Pulverklassen vorgenommen [12] [17].



Die jeweilige Pulverklasse (Tabelle 4) gibt an, für welche Grundwerkstoffe die Schweißpulver geeignet sind:

**Tabelle 3 - Hauptbestandteile der Schweißpulver nach DIN EN ISO 14174:2012-05 [17]**

Kennzeichen	Hauptbestandteile	Anteil
MS (Mangan-Silikat)	MnO + SiO <sub>2</sub> CaO	≥ 50 % ≤ 15 %
CS (Calcium-Silikat)	CaO + MgO + SiO <sub>2</sub> CaO + MgO	≥ 55 % ≥ 15 %
CG (Calcium-Magnesium)	CaO + MgO CO <sub>2</sub> Fe	5 ... 50 % ≥ 2 % ≤ 10 %
CB (Calcium-Magnesium basisch)	CaO + MgO CO <sub>2</sub> Fe	30 ... 80 % ≥ 2 % ≤ 10 %
CG-I (Calcium-Magnesium mit Eisen)	CaO + MgO CO <sub>2</sub> Fe	5 ... 45 % ≥ 2 % 15 ... 60 %
CB-I (Calcium-Magnesium basisch mit Eisen)	CaO + MgO CO <sub>2</sub> Fe	10 ... 70 % ≥ 2 % 15 ... 60 %
GS (Magnesium-Silikat)	MgO + SiO <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> CaO + CaF <sub>2</sub>	≥ 42 % ≤ 20 % ≤ 14 %
ZS (Zirkonium-Silikat)	ZrO <sub>2</sub> + SiO <sub>2</sub> + MnO ZrO <sub>2</sub>	≥ 45 % ≥ 15 %
RS (Rutil-Silikat)	TiO <sub>2</sub> + SiO <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub>	≥ 50 % ≥ 20 %

**weiter Tabelle 3 - Hauptbestandteile der Schweißpulver nach DIN EN ISO 14174:2012-05 [17]**

Kennzeichen	Hauptbestandteile	Anteil
AR (Aluminat-Rutil)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + TiO <sub>2</sub>	≥ 40 %
BA (Basisch-Aluminat)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + CaF <sub>2</sub> + SiO <sub>2</sub> CaO SiO <sub>2</sub>	≥ 55 % ≥ 8 % ≤ 20 %
AAS (Aluminat-Silikat-sauer)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + SiO <sub>2</sub> CaF <sub>2</sub> + MgO	≥ 50 % ≥ 20 %
AB (Aluminat-basisch)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + CaO + MgO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> CaF <sub>2</sub>	≥ 40 % ≥ 20 % ≤ 22 %
AS (Aluminat-Silikat)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + SiO <sub>2</sub> + ZrO <sub>2</sub> CaF <sub>2</sub> + MgO ZrO <sub>2</sub>	≥ 40 % ≥ 30 % ≥ 5 %
AF (Aluminat-Fluorid-basisch)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + CaF <sub>2</sub>	≥ 70 %
FB (Fluorid-basisch)	CaO + MgO + CaF <sub>2</sub> + MnO SiO <sub>2</sub> CaF <sub>2</sub>	≥ 50 % ≤ 20 % ≥ 15 %
Z	alle anderen Zusammensetzungen	

**Tabelle 4 - Einteilung der Schweißpulver nach Pulverklassen gemäß DIN EN ISO 14174:2012-05 [17]**

Klasse 1	für un- und niedriglegierte Stähle zum Verbindungs- und Auftragschweißen (Ein- und Mehrlagenschweißen)
Klasse 2 und 2B	für nichtrostende und hitzebeständige Stähle und Nickelwerkstoffe zum Verbindungs- und Auftragschweißen
Klasse 3	bevorzugt zum Auftragschweißen zu nutzen verschleißfestes Schweißgut durch Zubrand von C, Cr und Mo
Klasse 4	Andere Schweißpulver, für die die Klassen 1 bis 3 nicht gelten. (z.B. Pulver für Kupferlegierungen)

Gemäß DIN EN ISO 14174:2012-05 ist für Schweißpulver folgende Bezeichnungsart festgelegt [17]:

**ISO 14174 - S F CS 1** 67 AC H10.

Hervorgehoben wurde der gemäß Norm verbindliche Teil. Im Einzelnen schlüsselt sich die Bezeichnung wie folgt auf [17]:

ISO 14174	Nummer der gültigen Norm (DIN EN ISO 14174)
S	Kennbuchstabe des Verfahrens (Unterpulverschweißen)
F	Herstellungsart (erschmolzenes Pulver )
CS	Pulvertyp (Calcium-Silikat)
1	Kennzahl für die Anwendung (Pulverklasse)
67	metallurgisches Verhalten gemäß DIN EN ISO 14174 (Punkt 4.5) → Ziffer 1 – Ab-/Zubrand Si (1..4: Abbrand; 5: neutral; 6..9: Zubrand) → Ziffer 2 – Ab-/Zubrand Mn (1..4: Abbrand; 5: neutral; 6..9: Zubrand)
AC	Stromart (Wechselstrom)
H10	diffusibler Wasserstoff im Schweißgut (10 ml/100 g)

Für das UP-Schweißen von hochfesten Stählen wird mit fluoridbasischen Schweißpulvern gearbeitet. Nur diese gewährleisten die geforderten Zähigkeitswerte und eine ausreichende Sicherheit gegenüber Rissbildungen. Sie müssen entsprechend der Herstellerangaben rückgetrocknet werden.

Beispielsweise gibt die ESAB-GmbH in [4] nachfolgend aufgeführte Richtwerte für die Rücktrocknung an:

- agglomerierte Pulver → Temperatur  $300\text{ °C} \pm 25\text{ °C}$       Zeit 2 ... 4 h
- erschmolzene Pulver → Temperatur  $250\text{ °C} \pm 25\text{ °C}$       Zeit 2 ... 4 h.

Hochbasische Pulver werden derzeit nur als agglomerierte Pulver angeboten.

Nach [18] wird nun auch Bimssteingranulat als wichtiger mineralischer Zuschlag für Schweißpulver verwendet. Die Besonderheit liegt einerseits im geringen Phosphorgehalt, welcher sich qualitätssteigernd auf die Schweißnaht auswirkt und andererseits begünstigen die Mikroporen des Granulats ein gutes Ausgasen der Schmelze [18].

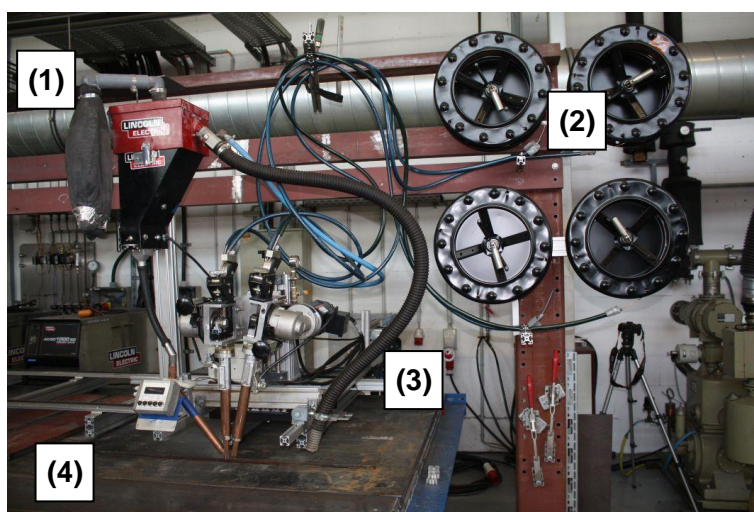
## 4 Versuchseinrichtung und Versuchswerkstoffe

### 4.1 Versuchsplanung

Die im Rahmen der Diplomarbeit durchgeführten Schweißversuche bauten auf den Erkenntnissen aus dem Praktikumsversuch auf. Bereits im Vorfeld wurden 12 Proben mit Parametervariationen geschweißt und auf ihre Zähigkeit hin untersucht. Die Ergebnisse wurden im Praktikumsbeleg dargelegt.

### 4.2 Versuchsaufbau

Die Schweißversuche wurden mit der auf Abbildung 18 gezeigten Unterpulver-Schweißanlage durchgeführt. Die Anlage ist ein Eigenbau der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt Mecklenburg-Vorpommern GmbH und kann im Bedarfsfall für Schweißaufgaben in Position PA, PB oder PC umgebaut werden. Die Hauptkomponenten lieferte die Firma Lincoln Electric. Der benötigte Schweißstrom wurde von zwei Aggregaten vom Typ ‚Lincoln Electric Power Wave AC/DC 1000 SD‘ (Abbildung 19) bereitgestellt. Jede dieser Stromquelle ist in der Lage, bei einer Einschaltdauer von 100 % einen Schweißstrom von bis zu 1000 A bereitzustellen. Mit einer solch getrennten Stromversorgung war es möglich, mit der Tandemvariante (siehe Abschnitt 3.2.1.7) zu arbeiten (Abbildung 20).

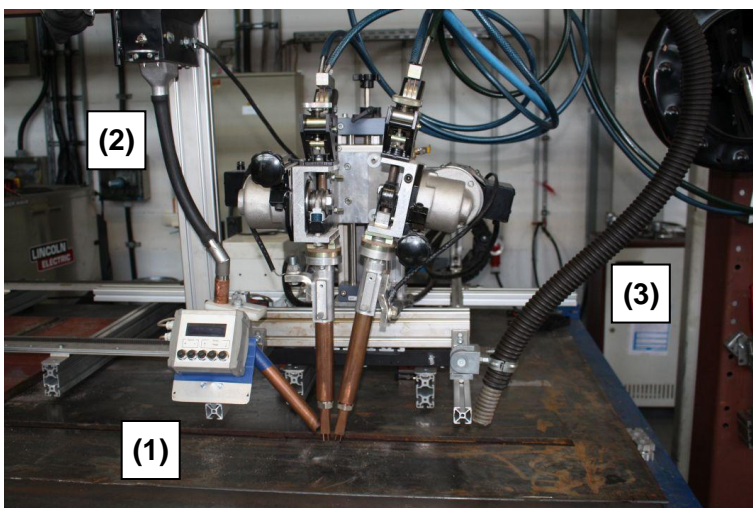


**Abbildung 18 - UP-Schweißanlage mit Pulverbehälter (1), Drahtführung und -förderung (2), Tandemschweißkopf (3) und Schweißstisch (4) (Hersteller: SLV M-V GmbH, Lincoln Electric)**

Wie beim Stand der Technik bereits erwähnt, wird die erste Drahtelektrode mit Gleichstrom und die zweite mit Wechselstrom betrieben, damit unter anderem eine Beeinflussung und Ablenkung der Lichtbögen durch die magnetische Blaswirkung vermindert wird.



**Abbildung 19 - Stromquellen 'Lincoln Electric' Power Wave AC/DC 1000 SD**



**Abbildung 20 - Tandemschweißkopf mit Geschwindigkeitsregelung (1), Pulverzuführung (2) und -absaugung (3)**

Gemäß der Angaben des Herstellers wurde das in den Schweißversuchen verwendete Schweißpulver mehrere Stunden in einem Temperaturbereich zwischen 280°C und 300°C

rückgetrocknet. Da Schweißpulver je nach Lagerbedingungen einen kleinen oder etwas größeren Anteil der Feuchtigkeit der Umgebung aufnehmen, sollten Schweißpulver vor dem Verarbeiten rückgetrocknet werden, um ein risssicheres Schweißen zu ermöglichen [19]. Zum Rücktrocknen kamen zwei Elektrodenöfen zum Einsatz (Abbildung 21). Diese konnten so eingestellt werden, dass das Pulver über mehrere Stunden bei einer Temperatur von ca. 300°C aufbewahrt werden konnte. In der Industrie erfolgt die Rücktrocknung des Schweißpulvers in größeren Öfen.



**Abbildung 21 - Elektrodenofen zum Rücktrocknen des Schweißpulvers**

Vor jeder Schweißung wurde das Pulver ausgetauscht. Dazu wurde das Pulver vom vorhergehenden Schweißtag aus dem Pulverbehälter entfernt und durch frisches Pulver, welches direkt aus der Vorwärmeinrichtung entnommen wurde, ersetzt. Gleichzeitig wurde so der Füllstand des Pulverbehälters überprüft. Wird eine Füllstandprüfung bzw. Füllstandkorrektur nicht im Vorfeld durchgeführt, kann im ungünstigsten Fall die Pulverzufuhr versiegen. Ohne das Pulver kann sich während des Schweißens die Kaverne nicht bilden, der Lichtbogen brennt nicht mehr stabil und es kommt zu starken Kurzschlüssen mit massiver Spritzerbildung. Außerdem wäre das Schweißbad dem Sauerstoff der Umgebung ausgesetzt und die Qualität der Schweißnaht würde merklich nachlassen (u.a. Bildung von Oberflächenporen).

### 4.3 Versuchswerkstoffe

Bei dem Versuch kamen Bleche mit einer Stärke von 50 mm aus hochfesten Feinkornbaustahl S960QL (Werkstoffnummer 1.8933) zum Einsatz. Die Schmelzanalyse des Herstellers ergab nachfolgend aufgeführte Werte:

**Tabelle 5 - chemische Zusammensetzung des Grundwerkstoffes S960QL (Charge 682458)\***

Kohlenstoff:	0,16 %	Silizium:	0,24 %	Mangan:	0,94 %
Phosphor:	0,011 %	Schwefel:	0,001 %	Aluminium:	0,02 %
Bor:	0,0002 %	Chrom:	0,66 %	Kupfer:	0,02 %
Molybdän:	0,50 %	Stickstoff:	0,003 %	Niob:	0,003 %
Nickel:	1,80 %	Titan:	0,003 %	Vanadium:	0,08 %

\* Das 3.1-Zeugnis (Nr.: 1715917001) ist Teil der Anlage 1.

Mit diesen Werten lässt sich mit folgender Gleichung das Kohlenstoffäquivalent CET bestimmen [9].

$$\text{CET} = \text{C} + \frac{\text{Mn} + \text{Mo}}{10} + \frac{\text{Cr} + \text{Cu}}{20} + \frac{\text{Ni}}{40}. \quad (\text{Gleichung 2})$$

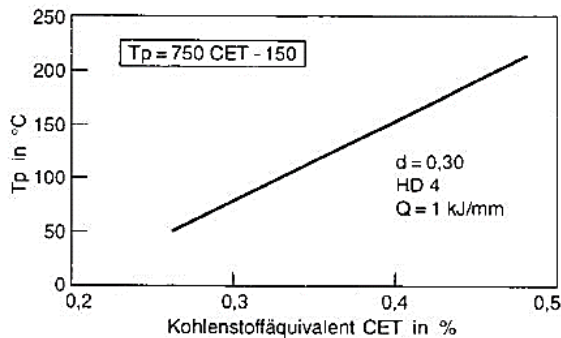
Das Kohlenstoffäquivalent CET wurde 1991 von Uwer und Höhne formuliert und stellt das zurzeit umfassendste Kohlenstoffäquivalent zur Vermeidung von Kaltrissen dar. Das Kohlenstoffäquivalent CEV (Gleichung 3) gemäß DIN EN 10025-1:2004 Punkt 7.2.3 [8] wurde 1967 vom IIW (International Institute of Welding – Internationales Schweißinstitut) herausgegeben. Das CEV beruht auf Untersuchungen, die zur Härtebarkeit durchgeführt wurden. Es wurde abgeleitet unter der Annahme, dass die zur Aufhärtung beitragenden Elemente ebenso die Kaltrissneigung begünstigen bzw. fördern. Untersuchungen dazu aber haben gezeigt, dass diese Annahme nicht zutrifft.

$$\text{CEV} = \text{C} + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V}}{5} + \frac{\text{Ni} + \text{Cu}}{15}. \quad (\text{Gleichung 3})$$

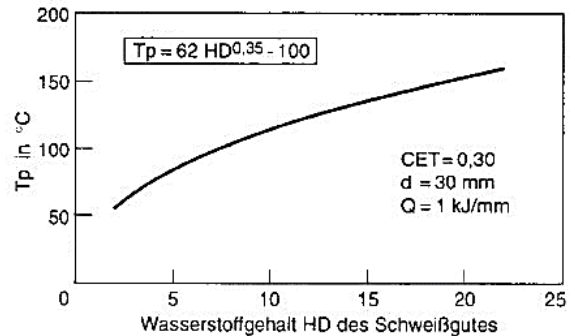
Berücksichtigt man die für das Kohlenstoffäquivalent CET relevanten Elemente Mangan, Molybdän, Chrom, Kupfer und Nickel, so ergibt sich nach Gleichung 2 ein Wert von 0,38%. Nur für das Kohlenstoffäquivalent CEV ist ein Maximalwert definiert, in der derzeit aktuellen Fassung der DIN EN 10025-6:2009-08 mit 0,82%. Unter Berücksichtigung der für das CEV relevanten Elemente ergibt sich nach Gleichung 3 ein Wert von 0,69%.

Damit Kaltrisse in der Schweißnaht vermieden werden, sollten die Schweißstücke aus Feinkornbaustählen vorgewärmt werden. Das Kaltrissverhalten von Schweißverbindungen ist von der chemischen Zusammensetzung des Grundwerkstoffes und des Schweißgutes, der Bauteildicke, der eingebrachten Wärmemenge, vom Wasserstoffgehalt des Schweißgutes (Abbildung 22) und dem Eigenspannungszustand der zu schweißenden Bauteile abhängig. Steigende Anteile der Legierungselemente, eine größere Bauteildicke und ein höherer Wasserstoffgehalt in der Schweißnaht begünstigen die Gefahr der Entstehung von Kaltrissen und erfordern somit eine höhere Vorwärmtemperatur. Wird mehr Wärme in den Schweißprozess eingebracht, wirkt man der Kaltrissneigung entgegen.

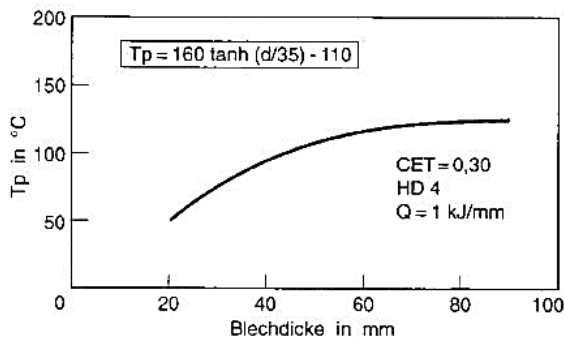




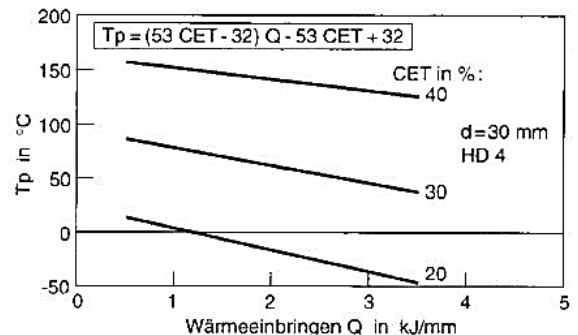
**Bild 1:** Mindestwerte der Vorwärmtemperatur  $T_p$  in Abhängigkeit vom Kohlenstoffäquivalent CET



**Bild 3:** Mindestwerte der Vorwärmtemperatur  $T_p$  in Abhängigkeit vom Wasserstoffgehalt HD in  $\text{cm}^3/100$  g Schweißgut nach DIN 8572



**Bild 2:** Mindestwerte der Vorwärmtemperatur  $T_p$  in Abhängigkeit von der Blechdicke  $d$



**Bild 4:** Mindestwerte der Vorwärmtemperatur  $T_p$  in Abhängigkeit vom Wärmeeinbringen  $Q$ ; Mindestwerte der Vorwärmtemperatur unterhalb Umgebungstemperatur bedeuten, daß nicht vorgewärmt zu werden braucht

## Abbildung 22 - Einflussgrößen auf die Vorwärmtemperatur [20]

Allerdings ist die Erhöhung der eingebrachten Wärmemenge bei hochfesten Feinkornbaustählen nicht nur vorteilhaft. Zu langes Einwirken hoher Temperaturen rufen nachteilige Gefügeveränderungen in der WEZ hervor. Abbildung 23 zeigt den Einfluss der verschiedenen Temperaturen auf die Gefügestruktur. Auf der Grafik ist bei Punkt 1 deutlich die Grobkornzone zu erkennen. Diese Zone stellt einen potenziellen Schwachpunkt in der Wärmeeinflusszone und somit innerhalb der Schweißverbindung dar. Grobkörnige Gefüge bewirken einen Abfall der Festigkeit und einen Anstieg der Sprödigkeit. Da die Schweißverbindung gerade im Tieftemperaturbereich geforderten Belastungen standzuhalten hat, muss der Ausbildung von Grobkornzonen durch reduziertes Vorwärmen, Halten der Temperatur und kontrolliertes Abkühlen ( $t_{8/5}$ -Zeit) entgegen gewirkt werden [2] [4] [20]. Bei Punkt 2 wird die Feinkornzone angedeutet. Diese Zone zeichnet sich durch eine gute Verformungsbarkeit, Festigkeit und Zähigkeit aus. An die Feinkornzone schließt sich eine Zone der teilweisen Gefügeumwandlung an. Zu erkennen ist diese Zone an rosettenförmigen Gebilden vorzugsweise entlang der Korngrenzen (Abbildung 24). Diese Gefügeausbildung wird als Troostit bezeichnet. Unter Troostit versteht man eine feinststreifige Sonderform des Perlits, die bei höheren Abkühlgeschwindigkeiten entsteht. Bedingt durch das schnelle Abkühlen erfolgt keine vollständige Umwandlung des Austenits in der Perlitstufe.



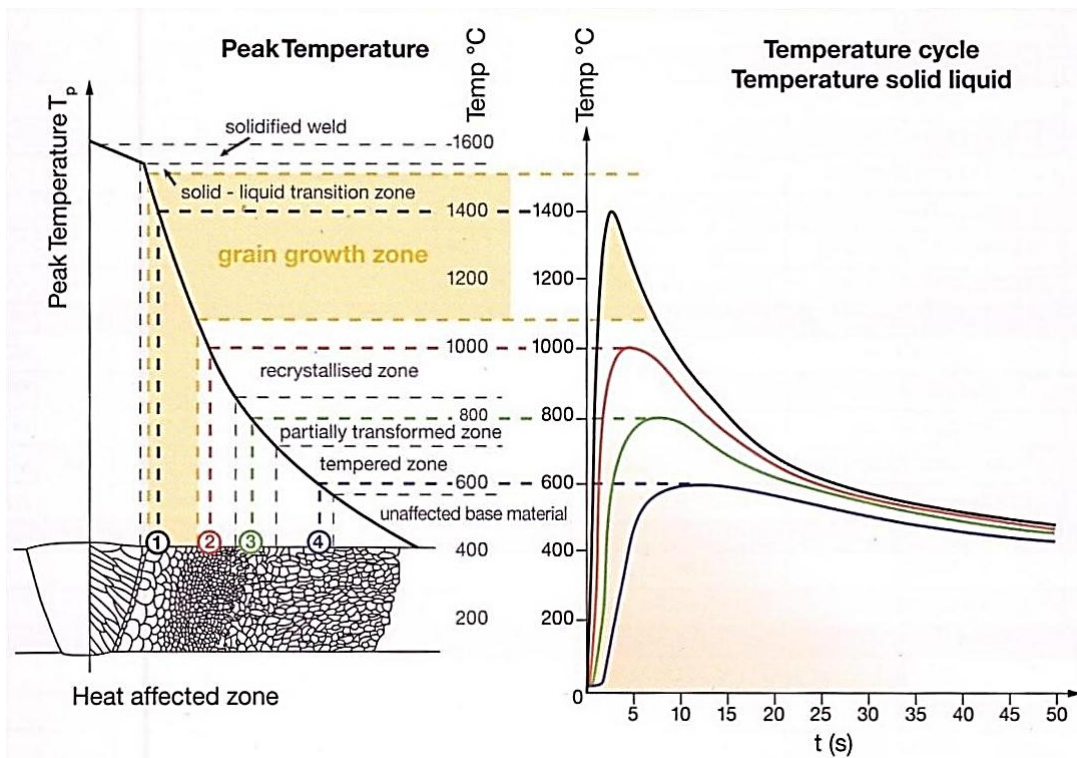


Abbildung 23 - Temperatureinfluss auf das Gefüge während des Schweißprozesses [4]

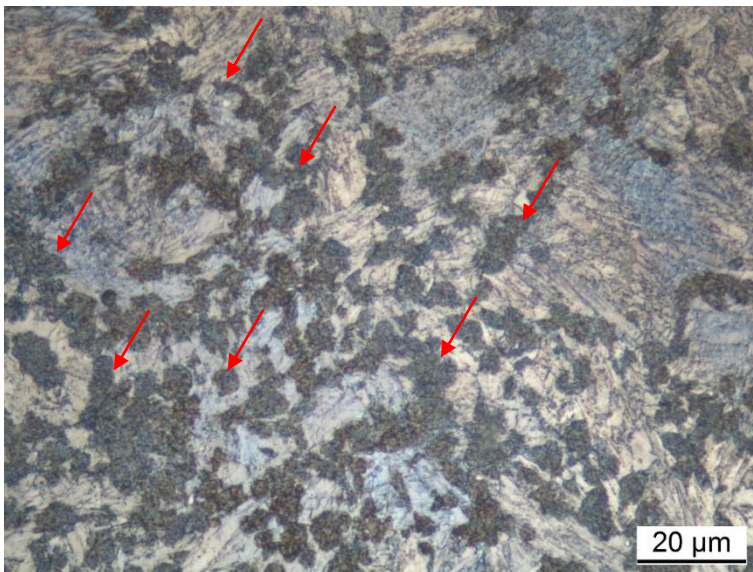
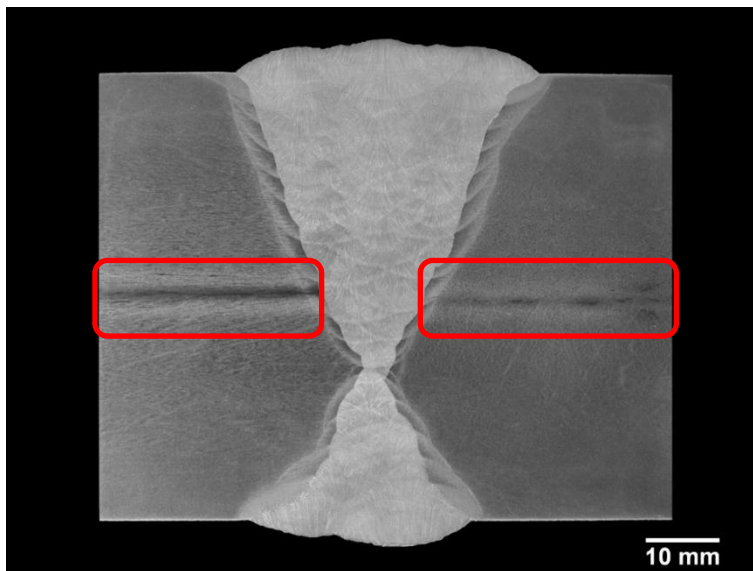


Abbildung 24 - Ausbildung von Troostitrosetten bei 1000-facher Vergrößerung (Markierung der bräunlich eingefärbten Bereiche durch Pfeile)

Ein weiteres Problem stellen auch so genannte Seigerungszone in dickwandigen Bauteilen dar (Abbildung 25). Diese Zonen bilden sich beim Herstellungsprozess durch Anteile bestimmter Stahlbegleitelemente. Vom derzeitigen Stand der Technik ausgehend ist es möglich, diese Anteile in einem gewissen Maß zu begrenzen. Näheres dazu steht in den jeweiligen Regelwerken für den Herstellungsprozess. Die Begleitelemente konzentrieren sich, bedingt durch vergleichsweise niedrigere Schmelztemperaturen in der Mitte des

Blechquerschnittes. Dadurch kommt es über diesen Querschnitt sehr häufig zu großen Zähigkeitsunterschieden. Nachweise für die Kerbschlagarbeit sind laut DIN EN 10025-6 aus diesem Bereich vom Hersteller nicht zu erbringen. Dies ist besonders zu beachten, wenn Schweißverbindungen mit Blechen unterschiedlicher Materialstärke durchgeführt werden. Bei der Parameterwahl muss unter Umständen berücksichtigt werden, dass oberflächennahe Bereiche des einen Bleches eventuell mit Seigerungszone des anderen Bleches verschweißt werden könnten.

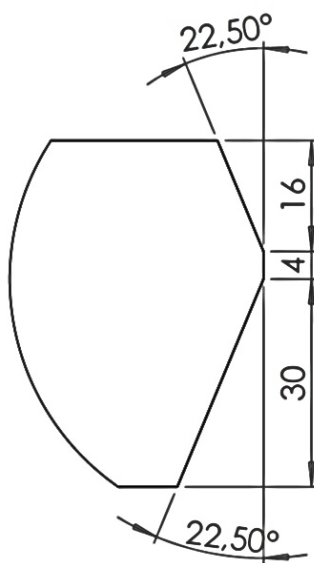


**Abbildung 25 - Markierung: Seigerungszone im Grundwerkstoff**

Der Nachweis der Zähigkeit wurde bereits im vorangegangenen Praktikum durchgeführt. Wie in Tabelle 8, Abschnitt 5.2.1 ersichtlich, liegen die Arbeitswerte der Kerbschlagzähigkeit deutlich über den durch die Norm festgelegten Anforderungen.

## 4.4 Probenvorbereitung

Für die Schweißproben der Vorversuche wurde eine Nahtvorbereitung nach DIN EN ISO 9692-2 gewählt. Die Abmessungen der Proben (Einzelbleche: 500 mm x 150 mm) wurden in Anlehnung an die DIN EN ISO 15614-1 gewählt. Um den Verzug der Probe nach dem Schweißen zu minimieren, fiel die Wahl auf eine unsymmetrische Doppel-Y-Fuge (DIN EN ISO 9692-2 / Kennziffer 2.4 [21]). Nachfolgende Skizze gibt Aufschluss über die Abmessungen der Nahtvorbereitung. Bei dieser Variante wird zunächst die flachere Seite (hier: 16 mm) mit Schweißgut gefüllt. Sollte sich bei der Probe infolge der Wärmeeinbringung ein Winkelverzug einstellen (beide Bleche liegen nicht mehr im Winkel von 180° zueinander), so wird diesem beim Verschweißen der tieferen Seite (hier: 30 mm) wieder entgegen gewirkt.



**Abbildung 26 - Nahtvorbereitung unsymmetrische Doppel-Y-Fuge der Vorversuche**

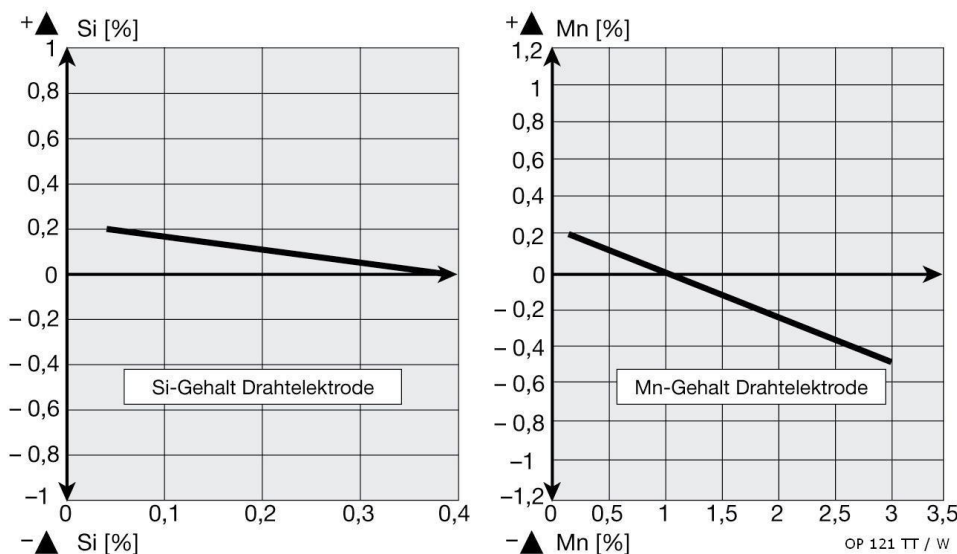
Das Anbringen der Nahtvorbereitung erfolgte bei den Proben der Vorversuche mittels Autogenbrennschnitt. Um die auswertbare Nahtlänge zu maximieren, wurden an den Proben Ein- und Auslaufbleche aus identischem Material durch MAG-Heftschweißungen angebracht. Diese Bleche verlagern den Nahtanfang und das Nahtende in einen Bereich, der für eine Prüfung bzw. für eine Weiterverwendung des Bauteiles irrelevant ist. Nach der Fertigstellung der Schweißnaht werden diese Bleche an den Heftstellen mittels Säge- oder Brennschnitt abgetrennt. Es empfiehlt sich, die Proben vor dem Anbringen der Ein- und Auslaufbleche vorzuwärmen. Die Temperatur richtet sich dabei nach dem Wert, der für die eigentliche Schweißaufgabe vorgesehen ist. Abbildung 27 zeigt eine vorbereitete Schweißprobe. Bedingt durch die Schweißrichtung wurde auf der rechten Seite das Einlaufblech und auf der linken Seite das Auslaufblech angebracht. Die Form der Bleche orientierte sich hierbei an der Nahtvorbereitung der zu schweißenden Bauteile.



**Abbildung 27 - Schweißprobe mit Ein- und Auslaufblech**

## 4.5 Schweißzusatz- und Hilfswerkstoffe

Zu- und Abbrand der Legierungselemente Si und Mn = f (Legierungsgehalt der Drahtelektrode)  
DVS-Merkblatt 0907 Teil 1



**Abbildung 28 - Zu- und Abbrandverhalten von Si und Mn bei Verwendung des Schweißpulvers OP121TT/W (Oerlikon) [9]**

Zur Abdeckung des Schweißprozesses kam im Versuch das agglomerierte Pulver OP121TT/W von Oerlikon zum Einsatz. Dieses Pulver ist besonders zum Verschweißen von hochfesten Feinkornbaustählen auch in Tandem- und Mehrdrahtschweißtechnik geeignet. Abbildung 28 zeigt das Abbrandverhalten von Si und Mn. Auch kaltzähe und alterungsbeständige Stähle können mit diesem Schweißpulver ohne Schwierigkeiten verschweißt werden. Häufig kommt dieses Pulver bei Offshore-Bauteilen in Verbindung mit geeigneten Schweißdrähten zum Einsatz. Bei der Verarbeitung mit den entsprechenden Drahtelektroden können sehr hohe Werte für die Tieftemperaturzähigkeit im Schweißgut erreicht werden. Die Schlacke, die sich bei Verwendung des OP121TT/W bildet, kann als kurz bezeichnet werden. Dies bedeutet, dass das Erstarrungsintervall sehr kurz ist und das Schweißen kleinerer Bauteildurchmesser ohne ein Abfließen der Schlacke möglich wird. Das Pulver ist mit Gleichstrom (plusgepolte Elektrode) und Wechselstrom bis etwa 800 A schweißbar [9]. Das Schweißpulver OP121TT/W hat nach Gleichung 1 einen Basizitätsgrad von 3,1 (Herstellerangabe). Die Hauptbestandteile des Pulvers sind in nachfolgender Tabelle aufgelistet.

**Tabelle 6 - Hauptbestandteile OP121TT/W**

SiO <sub>2</sub> + TiO <sub>2</sub>	CaO + MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + MnO	CaF <sub>2</sub>
15 %	35 %	20 %	30 %

Da die Anteile von CaO, MgO, MnO und CaF<sub>2</sub> zusammen mehr als 50 % ausmachen, wird das Pulver nach DIN EN ISO 14174 zu den fluorid-basischen Schweißpulvern ge-

zählt [17]. Als Schweißzusatz wurde ein Massivdraht der Firma Hermann Fliess GmbH & Co. mit der Bezeichnung UP-101 NiCrMo 2,5 (S3 NiCrMo 2,5) (Normbezeichnung: DIN EN ISO 26304-A S3Ni2,5CrMo) mit einem Durchmesser von 2,4 mm verwendet. Bei diesem Zusatzwerkstoff handelt es sich um einen UP-Schweißdraht, der beim Schweißen von hochfesten vergüteten Feinkornbaustählen mit einer Streckgrenze von 690 N/mm<sup>2</sup> eingesetzt wird. Gemäß 3.1-Zeugnis setzt sich die Drahtelektrode aus folgenden Elementen zusammen:

**Tabelle 7 - Chemische Zusammensetzung in % (Massivdrahtelektrode UP-101 NiCrMo 2,5 (S3 NiCrMo 2,5))**

<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cu</b>	<b>Al</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>
0,14	0,19	1,52	0,007	0,006	0,028	0,002	0,58	0,51
<b>Ni</b>	<b>V</b>	<b>Ti</b>	<b>Nb</b>	<b>Sn</b>	<b>As</b>	<b>Sb</b>	<b>N</b>	
2,55	0,005	0,001	0,002	0,003	0,002	0,001	0,004	

Das 3.1-Zeugnis des Schweißzusatzwerkstoffes ist im Anhang Teil 1 enthalten.

## 5 Versuchsdurchführung und Auswertung

### 5.1 Prüfverfahren für die Qualifizierung eines Schweißprozesses nach DIN EN ISO 15614-1

Jeder metallverarbeitende Betrieb, der im bauaufsichtlich geregelten Bereich tätig sein will, muss einer zertifizierten Stelle oder Klassifizierungsgesellschaft nachweisen, dass er die Schweißverfahren, mit denen er in späteren Projekten arbeiten möchte, reproduzierbar beherrscht. Ein Mittel, um dieses nachzuweisen, ist die Qualifizierung eines Schweißverfahrens nach geltenden Normen. Für Lichtbogen- und Gasschweißen von Stählen und Lichtbogenschweißen von Nickel und Nickellegierungen werden diese Verfahrensprüfungen in der DIN EN ISO 15614-1 geregelt. In dieser Norm werden folgende Festlegungen getroffen [22]:

- Abmessungen der Proben in Abhängigkeit von Probenform und Nahtart
- Prüfumfang in Abhängigkeit von Nahtart
- Lage und Entnahmeorte der Proben in Abhängigkeit vom Prüfstück
- Umfang der Durchführung der zerstörenden Prüfungen
- Höchstwerte für Härte und Geltungsbereiche im Hinblick auf Werkstoffgruppierungen und Blechdicken
- Inhaltliche Vorgaben für eine WPQR (**W**elding **p**rocedure **q**ualification report)

#### 5.1.1 Sichtprüfung nach DIN EN ISO 17637

Als ältestes und einfachstes Prüfverfahren ist eine Sicht- bzw. visuelle Prüfung grundsätzlich der erste Prüfschritt, welcher an einem Bauteil durchgeführt wird bzw. durchgeführt werden sollte. Jeder, der einem Prozess beiwohnt und nur durch einfaches Hinsehen Unregelmäßigkeiten im Prozessablauf oder an der Schweißnaht feststellt führt, ganz gleich ob bewusst oder unbewusst, eine Sichtprüfung durch. Im Gegensatz zu anderen zerstörungsfreien Prüfverfahren liefert eine Sichtprüfung keine Anzeigen, sondern es erfolgt eine direkte Beobachtung der Qualitätsmerkmale. Solche Merkmale können Materialfehler, Maßabweichungen oder Oberflächengüten sein. Um eine Sichtprüfung normgerecht durchführen zu können, bedarf es unter Umständen Beleuchtungseinrichtungen und Hilfsmitteln wie Endoskope, Lupen oder Spiegel. In vielen Fällen ist der Einsatz von Messmitteln, z.B. Schweißnahtlehren, Messschiebern oder Stahlmaßstäben erforderlich. Bei der Sichtprüfung wird zwischen direkter Sichtprüfung (ununterbrochener Strahlengang zwischen Auge und Prüfstück) und indirekter Sichtprüfung (unterbrochener Strahlengang



zwischen Auge und Prüfstück) unterschieden. Die indirekte Sichtprüfung umfasst die Anwendung von Foto- und Videotechnik, automatisierten Anlagen und Robotern.

### 5.1.2 Magnetpulverprüfung nach DIN EN ISO 17638

Um die Magnetpulverprüfung anwenden zu können, muss das zu prüfende Bauteil ferromagnetisch sein. Gemäß DIN EN ISO 17638 wird eine magnetische Tangentialfeldstärke von 2 kA/m bis 6 kA/m empfohlen [23]. Das Prüfstück wird einem von außen wirkendem Magnetfeld ausgesetzt. Der Ausbreitung dieses Magnetfeldes setzen ferromagnetische Stoffe keinen Widerstand entgegen. Sie unterstützen vielmehr die Durchflutung, denn ihre Permeabilität liegt etwa um den Faktor 1000 über dem Wert der magnetischen Leitfähigkeit für Luft oder Aluminium. Treten innerhalb eines Querschnitts flächige Unregelmäßigkeiten oder Fehler (Materialtrennungen) auf, so wird an diesen Stellen die Ausbreitung der Feldlinien behindert und sie werden umgelenkt. Dabei verhält sich die Umlenkung proportional zur Störung. Damit die Unregelmäßigkeit sichtbar wird, muss sie sich an der Oberfläche oder zumindest in Oberflächennähe befinden und eine entsprechende Größe aufweisen. Treffen diese Bedingungen auf die Störung zu, dann werden die Feldlinien gezwungen, aus dem Bauteil auszutreten und sich in der Luft fortzubewegen, welche bekanntlich einen hohen magnetischen Widerstand hat. Diese Erscheinung wird Streufluss genannt. Das Sichtbarmachen des Streuflusses erfolgt in der Praxis durch fluoreszierend eingefärbte Eisenpartikel, welche in so genannten Rissprüfölen (z.B.: Petroleum) aufgeschlämmt werden. Die Magnetpulverprüfung findet vor allem im Stahlbau bei der Prüfung von Schweißnähten Anwendung, weil sie ein einfaches, schnelles und kostengünstiges Verfahren ist. Zu ermitteln sind mit diesem Prüfverfahren Risse, Poren, Durchbrand, ungenügende Durchschweißungen, Kerben und Bindefehler.

### 5.1.3 Ultraschallprüfung nach DIN EN ISO 17640

Bei dickwandigen Bauteilen kommt zur Feststellung von innenliegenden (auch tiefliegenden) Fehlern die Ultraschallprüfung zum Einsatz. Dieses Prüfverfahren wird darüber hinaus zum schnellen Auffinden von Dopplungen und Terrassenbrüchen verwendet. In der Praxis kommt das Impuls-Echoverfahren (Prüfkopf ist Sender und Empfänger) für Schweißnahtprüfungen zum Einsatz. Ultraschallwellen (Frequenz: 0,1 ... 10 MHz) werden als kurzer Impuls im Prüfkopf erzeugt und in das Werkstück eingeleitet. Die Schallwellen werden von der Rückwand des Bauteils reflektiert und das Echo wird vom Prüfkopf wieder in einen elektrischen Impuls umgewandelt. Auf dem Bildschirm beschreibt der Abstand zwischen dem Sendeimpuls und dem Rückwandecho die Bauteildicke. Schlägt das Signal vorher aus, kann der Prüfer in etwa die Position der Unregelmäßigkeit anhand der Lage des Fehlerechos feststellen. Die Ultraschallprüfung findet besonders im Stahlbau Anwen-



derung, Geprüft werden hier vor allem Stumpfnähte und durchgeschweißte T-Stöße. Die Auswertung der Ultraschallbilder sollte durch qualifiziertes Prüfpersonal vorgenommen werden, da Unregelmäßigkeiten nur durch richtige Interpretation bewertet und geortet werden können. Mit dem Ultraschallprüfverfahren lassen sich Risse, Poren, Kerben, Bindefehler und Einschlüsse ab einer Größenordnung von 0,2 mm erkennen, die eine Ausdehnung quer zur Schallrichtung haben. Aus diesem Grund wird meist mit drei unterschiedlichen Winkelprüfköpfen geschallt.

#### 5.1.4 Querkzugprüfung nach DIN EN ISO 4136

Eine Aussage über die Festigkeit einer Schweißnaht liefert der Zugversuch, der auch als Grundversuch der statischen Festigkeitslehre bezeichnet wird. Um zu prüfen, ob die Schweißnaht die gleichen oder ähnlichen Festigkeitswerte wie der Grundwerkstoff hat, werden aus den Schweißproben Querkzugproben hergestellt, bei denen sich die Schweißnaht in der Mitte befindet. Die Proben werden bei diesem Versuch mit einer definierten Kraft stufenlos gedehnt, bis es zu einem Versagen der Probe kommt. Protokolliert werden in dem Zusammenhang die Abmessungen der Probe, die maximale Kraft, die zum Auseinanderziehen der Zugprobe benötigt wurde, die Streck- bzw. Dehngrenze, die Zugfestigkeit, die Bruchdehnung und die Bruchlage. Um den kompletten Bereich einer Schweißnaht prüfen zu können, müssen unter Umständen bei dickwandigen Bauteilen mehrere Querkzugproben gefertigt werden. Bedingt durch die maximale Zugkraft der Prüfmaschine von 600 kN (Abbildung 29) musste im Vorfeld die maximal mögliche Probenbreite ermittelt werden. Dadurch wurde sichergestellt, dass der Zugversuch erfolgreich durchgeführt werden konnte. Nach Auswertung der Gleichung 4 und Einbringung persönlicher Erfahrungen seitens des Prüfpersonals wurde die Probenbreite und –dicke auf 20 mm festgelegt.

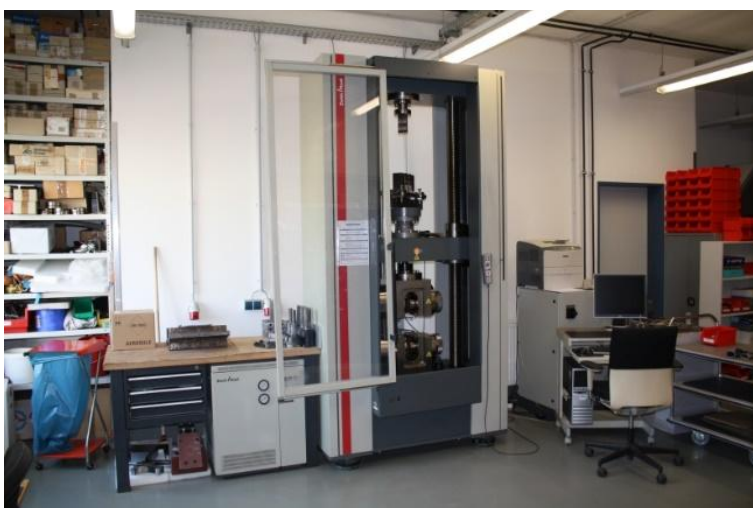
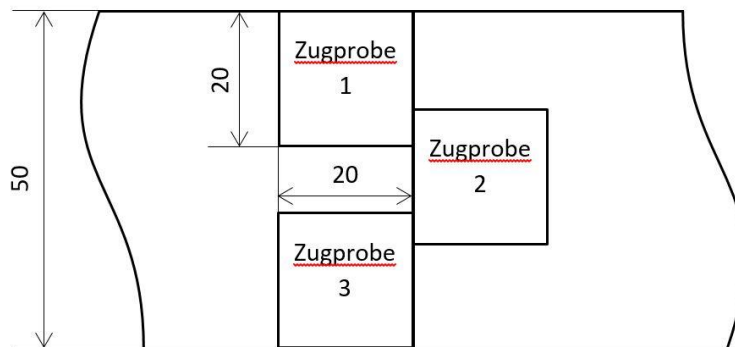


Abbildung 29- Universal-Werkstoffprüfmaschine Zwick Z600 (Zug- und Druckkraft: 600 kN)

Gleichung zur Berechnung der maximalen Probendicke  $a_{\max}$ :

$$a_{\max} = \frac{\text{Arbeitsvermögen der Prüfmaschine}}{(\text{maximale Zugfestigkeit (Normwert)} \cdot \text{Probenbreite})} \quad (\text{Gleichung 4})$$

Die Entnahme der Zugproben erfolgte quer zur Schweißnaht nach folgendem Muster (Abbildung 30):



**Abbildung 30 - Lage der Zugproben im Blech mit  $t = 50$  mm (schematisch)**

### 5.1.5 Biegeprüfung nach DIN EN ISO 5173

Der Biegeversuch, früher auch als technologischer Biegeversuch bezeichnet, dient dazu, das Biegeverhalten (plastische Verformbarkeit, Umformvermögen) metallischer Werkstoffe zu prüfen. Er kann sowohl an Grundwerkstoffen als auch an Schweißverbindungen ausgeführt werden. Die Probenform richtet sich dabei nach der Geometrie des zu prüfenden Ausgangsmaterials. Sie kann einen runden, quadratischen, rechteckigen oder viereckigen Querschnitt aufweisen. Grundsätzlich wird die Probe bei Raumtemperatur durch die Biegung plastisch bis zum Erreichen eines bestimmten Biegewinkels verformt, ohne dass sich dabei die Beanspruchungsrichtung ändert. Erfolgt die Biegung bis zu einem Winkel von  $180^\circ$ , wird von Faltversuchen gesprochen. Bei Schweißverbindungen können die Proben quer oder längs aus der Schweißnaht entnommen werden. Dabei befinden sich entweder eine der Oberflächen oder die Querschnitte der Schweißverbindung unter Zugbeanspruchung.

Der Biegeversuch an Schweißverbindungen hat die Aufgabe, neben dem Biegewinkel  $\alpha$  auch die Dehnung der Außenfaser zu bestimmen (Biegedehnung). In diesem Zusammenhang wirkt sich die Ausführung der Schweißverbindung signifikant auf den erreichbaren Biegewinkel aus. So sind Unregelmäßigkeiten wie Poren, Bindefehler, Einschlüsse, Einbrandkerben usw. in der Regel dafür verantwortlich, wenn der geforderte Biegewinkel nicht erreicht wird.

Dieser ist u. a. von folgenden Faktoren abhängig:

- Ausbildung und Beschaffenheit der Proben wie Probenabmessung, Oberflächenbeschaffenheit, Verhältnis der Zugfestigkeit des Schweißgutes zur Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs.
- Versuchsanordnung und -durchführung wie Lage der Wurzel, Stützweite, Biegedorndurchmesser und Verformungsgeschwindigkeit.

### **5.1.6 Kerbschlagbiegeprüfung nach DIN EN ISO 9016**

Beim Kerbschlagbiegeversuch wird die Prüfung am Schweißgut mit VWT-Probenkörpern (V - Charpy-V-Kerbe; W - Kerbe im Schweißgut; T - Kerbe durch die Dicke) durchgeführt. Für die Prüfung der Wärmeeinflusszone sind VHT-Probenkörper (V - Charpy-V-Kerbe; H - Kerbe in der WEZ; T - Kerbe durch die Dicke) zu verwenden. Zu beachten ist hierbei, dass für jede festgelegte Entnahmeposition ein Satz Proben, bestehend aus drei Einzelproben, angefertigt werden muss. Übersteigt die Materialstärke die 20 mm-Marke, so müssen mindestens zwei zusätzliche Probensätze aus dem Prüfstück entnommen werden. Entnahmestellen für diese Sätze sind das Schweißgut und die Wärmeeinflusszone entweder vom Nahtmittelenbereich oder, bei ausreichender Stärke der Schweißnaht, aus dem Bereich der Wurzellage. Sollen Mischverbindungen geprüft werden, so sind Proben aus dem Grundwerkstoff und der Wärmeeinflusszone beider verschweißter Materialien zu entnehmen [22].

Die aufgebrachte Schlagarbeit sollte annähernd die Werte des Grundwerkstoffes erreichen. Aus den Arbeitswerten der drei Proben wird ein Mittelwert gebildet. Nur ein Einzelwert darf unter einem normativ festgelegten Mindest-Mittelwert liegen, muss aber mindestens 70 % dieses Wertes betragen. Zu einer Wiederholungsprüfung kommt es, wenn:

- der Mittelwert der ersten drei Proben unter dem festgelegten Mindest-Mittelwert liegt
- der Mindest-Mittelwert erfüllt, aber zwei Proben unter dem Mindest-Mittelwert liegen
- ein Einzelwert unter 70 % des festgelegten Mindest-Mittelwert liegt

Der Mittelwert aller 6 Prüfungen darf nicht kleiner sein als der festgelegte Mindest-Mittelwert (meist 27 Joule bei -40°C oder innerbetrieblich festgelegt). Von den 6 Einzelwerten dürfen höchstens 2 unter diesem Mindest-Mittelwert liegen, davon darf jedoch höchstens 1 Einzelwert weniger als 70 % des Mindest-Mittelwertes betragen [22].

Die Kerbschlagbiegeversuche wurden nach der DIN EN ISO 148-1 durchgeführt. Das im Versuch zum Einsatz gekommene Pendelschlagwerk wies ein Arbeitsvermögen von 450 Joule auf. Für die Ermittlung der Kerbschlagarbeitswerte war es notwendig, die num-

merierten Proben mittels eines Tiefkälte-Umwälzthermostats auf  $-40^{\circ}\text{C}$  abzukühlen. Nach Erreichen der Temperatur mussten die Kerbschlagproben innerhalb von 5 Sekunden zer schlagen werden, um relevante Werte für den geforderten Temperaturbereich zu erhalten. Die ermittelten Kerbschlagarbeitswerte wurden über eine Software in das Prüfprotokoll eingefügt und abgespeichert. Die Protokolle geben Aufschluss über die Probengeometrie, den Arbeitsinhalt des Pendels, die erreichten Einzelarbeitswerte in Joule und Prozent (100% = Arbeitsinhalt des Pendels) und die daraus resultierenden Mittelwerte [24].



Abbildung 31 - Pendelschlagwerk (Arbeitsinhalt des Pendels: 450 Joule)

### 5.1.7 Makroskopische und mikroskopische Untersuchung von Schweißnähten gemäß DIN EN ISO 17639

Unter einer makroskopischen Untersuchung wird das Begutachten einer Probe durch das bloße Auge oder durch Anwendung einer geringen Vergrößerung verstanden. Dabei wird üblicherweise nicht mehr als 50-fach vergrößert. Die Untersuchung kann an einer geätzten oder ungeätzten Probe stattfinden. Soll eine Probe mikroskopisch untersucht werden, erfolgt die Begutachtung im geätzten oder ungeätzten Zustand bei einer 50- bis 500-fachen Vergrößerung (Normwert) [25]. Durch moderne Lichtmikroskope ist es derzeit möglich, mikroskopische Untersuchungen bei einer 1000-fachen Vergrößerung vorzunehmen. Makroskopische und mikroskopische Untersuchungen an Schweißnähten werden im Normalfall an Querschnittsflächen durchgeführt. Untersucht werden hierbei auf entsprechend vorbereiteten Oberflächen Mikrorisse, Kornstruktur, Ausscheidungsprodukte, Einschlüsse, Morphologie und Ausrichtung.

### 5.1.8 Härteprüfung gemäß DIN EN ISO 9015-1

Laut physikalischer Definition beschreibt die Härte den Widerstand, den ein Körper einem anderen beim Eindringen entgegensetzt. In der Technik gibt es mehrere Verfahren, die Härte eines Materials zu messen. Für Schweißverbindungen wird überwiegend das Härteverfahren nach Vickers angewendet. Dabei werden je nach Ausführung der Nähte Messungen mit einer, zwei oder drei Härtereihen durchgeführt. Bei einer einseitig einlagig geschweißten Stumpfnahht beispielsweise wird die erste Härtereihe an der Oberseite (Decklage) und zweite Reihe an der Unterseite (Wurzellage) eingebracht. Eine Härtereihe besteht aus insgesamt 15 Eindrücken. Unterteilt in Gruppen zu je drei Eindrücken werden diese im Grundwerkstoff, in der WEZ (davon einer möglichst nahe der Schmelzlinie) und im Schweißgut platziert. Die Eindrücke in den Grundwerkstoff und in die WEZ erfolgen jeweils links und rechts von der Schweißnaht. Bei einer zweiseitig mehrlagig geschweißten Stumpfnahht wird üblicherweise eine dritte Härtereihe verwendet. Diese wird dann meist in der mittleren Region der Probe, in der die Verbindung von Wurzellage und Decklage stattfand, platziert. Bei Eck- und T-Stößen ist die Verfahrensweise ähnlich, da auch mit Härtereihen zu je 15 Eindrücken gearbeitet wird. Die Härteprüfung wird mit einem Prüfgewicht von 49 N (HV 5) oder 98 N (HV 10) durchgeführt.

An Mikroschliffen kann eine Mikrohärteprüfung vorgenommen werden. Infolge der kleineren Prüfkraft (bis 1,96 N) und des kleineren Abdruckes, kann mit diesem Verfahren die Härte einzelner Gefügebestandteile (Körner, Ausscheidungen usw.) bestimmt werden. Anwendung findet die Mikrohärteprüfung vor allem in der Forschung und bei Schadensanalysen, da durch die Härtebestimmung einzelner Gefügesegmente eine leichtere Identifikation dieser Segmente möglich ist.

### 5.1.9 Bewertung von Unregelmäßigkeiten gemäß DIN EN ISO 5817

Um Schweißnähte normgerecht und einheitlich bewerten zu können, werden in der DIN EN ISO 5817 Bewertungsgruppen festgelegt. Die Norm gilt für Lichtbogenschweißprozesse, mit denen Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen bearbeitet werden. Die Unterteilung der Bewertungskriterien von Unregelmäßigkeiten, deren Bezeichnungen dreisprachig in der DIN EN ISO 6520-1 festgehalten sind, wird durch die Einteilung in drei Bewertungsgruppen erreicht. Die Kennzeichnung dieser Gruppen erfolgt durch die Kennbuchstaben B (höchste Anforderungen an Schweißnahtgüte), C und D (geringste Anforderungen an Schweißnahtgüte). Innerhalb der Bewertungsgruppen werden Zulässigkeitsgrenzen beschrieben, die bei folgenden Schweißprozessen Anwendung finden können [26]:

- 11 Metall-Lichtbogenschweißen ohne Gasschutz;
- 12 Unterpulverschweißen;
- 13 Metall-Schutzgasschweißen;
- 14 Wolfram-Schutzgasschweißen;

- 15 Plasmaschweißen;
- 31 Gasschweißen mit Sauerstoff-Brenngas-Flamme (nur für Stahl).

Wann welche Bewertungsgruppe festzulegen ist, entscheidet entweder eine Anwendungsnorm (z.B.: für Verfahrensprüfungen: DIN EN ISO 15614-1) oder der verantwortliche Konstrukteur zusammen mit dem Hersteller, Anwender und/oder anderen betroffenen Stellen [26].

## 5.2 Vorversuche

### 5.2.1 Durchführung der Vorversuche

Zur Eingrenzung der Schweißparameter wurden im vorangegangenen Praktikum Schweißproben auf ihre Zähigkeit untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 festgehalten:

**Tabelle 8 - Ergebnisse Kerbschlagbiegeversuch S960QL -40°C [27]**

-40°C	Probe 1				Probe 2				Probe 3				Probe 4				Probe 5			
	P1	P2	P3	$\bar{x}$	P1	P2	P3	$\bar{x}$	P1	P2	P3	$\bar{x}$	P1	P2	P3	$\bar{x}$	P1	P2	P3	$\bar{x}$
<b>SG D</b>	88	105	109	<b>101</b>	100	86	83	<b>90</b>	76	99	108	<b>94</b>	74	68	73	<b>72</b>	103	105	108	<b>105</b>
<b>SL D</b>	85	110	90	<b>95</b>	88	91	86	<b>88</b>	151	155	147	<b>151</b>	138	112	111	<b>120</b>	107	99	112	<b>106</b>
<b>SL2 D</b>	161	161	112	<b>145</b>	110	74	112	<b>99</b>	182	189	178	<b>183</b>	136	114	110	<b>120</b>	121	103	136	<b>120</b>
<b>SL5 D</b>	82	83	145	<b>103</b>	50	146	150	<b>115</b>	110	169	180	<b>153</b>	100	92	49	<b>80</b>	58	110	108	<b>92</b>
<b>SG M</b>	91	90	87	<b>89</b>	74	61	63	<b>66</b>	88	94	94	<b>92</b>	78	76	81	<b>78</b>	68	71	68	<b>69</b>
<b>SL M</b>	139	114	132	<b>128</b>	89	73	72	<b>78</b>	150	144	166	<b>153</b>	106	99	106	<b>104</b>	85	132	99	<b>105</b>
<b>SL2 M</b>	182	172	171	<b>175</b>	69	73	72	<b>71</b>	199	208	197	<b>201</b>	111	133	146	<b>130</b>	108	60	89	<b>86</b>
<b>SL5 M</b>	116	104	118	<b>113</b>	34	92	65	<b>64</b>	159	165	146	<b>157</b>	55	87	82	<b>75</b>	58	74	41	<b>58</b>

-40°C	Probe 6				Probe 7				Probe 8				Probe 9				Probe 10			
	P1	P2	P3	$\bar{x}$	P1	P2	P3	$\bar{x}$	P1	P2	P3	$\bar{x}$	P1	P2	P3	$\bar{x}$	P1	P2	P3	$\bar{x}$
<b>SG D</b>	68	94	67	<b>76</b>	83	108	87	<b>93</b>	108	107	107	<b>107</b>	115	104	127	<b>115</b>	128	135	117	<b>127</b>
<b>SL D</b>	92	124	130	<b>115</b>	123	128	100	<b>117</b>	117	134	130	<b>127</b>	121	121	80	<b>107</b>	101	83	152	<b>112</b>
<b>SL2 D</b>	144	149	139	<b>144</b>	189	206	188	<b>194</b>	193	177	183	<b>184</b>	158	158	153	<b>156</b>	130	148	174	<b>151</b>
<b>SL5 D</b>	178	199	182	<b>186</b>	212	223	208	<b>214</b>	69	68	77	<b>71</b>	192	223	194	<b>203</b>	190	167	188	<b>182</b>
<b>SG M</b>	75	78	79	<b>77</b>	74	80	72	<b>75</b>	96	94	101	<b>97</b>	75	51	54	<b>60</b>	102	96	100	<b>99</b>
<b>SL M</b>	145	122	142	<b>136</b>	86	113	98	<b>99</b>	147	146	141	<b>145</b>	120	143	100	<b>121</b>	135	157	129	<b>140</b>
<b>SL2 M</b>	124	167	168	<b>153</b>	203	208	221	<b>211</b>	199	179	208	<b>195</b>	149	175	159	<b>161</b>	116	156	126	<b>133</b>
<b>SL5 M</b>	38	72	73	<b>61</b>	93	41	58	<b>64</b>	155	139	145	<b>146</b>	156	130	73	<b>120</b>	123	87	119	<b>110</b>

Um belastbare Aussagen hinsichtlich der erreichbaren Festigkeiten treffen zu können, wurden zu Beginn des Projektes insgesamt zehn Proben nach dem folgenden zentralen zusammengesetzten Versuchsplan (ZZVP, Abbildung 32) geschweißt. Die Schweißparameter (Tabelle 9) orientierten sich dabei an den Werten der Schweißproben, an denen im Praktikum die Kerbschlagbiegeversuche durchgeführt wurden.

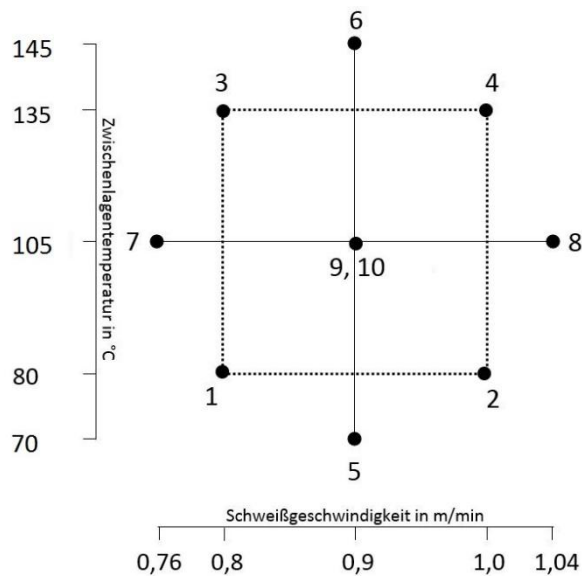


Abbildung 32 - ZZVP der Schweißversuche S960QL

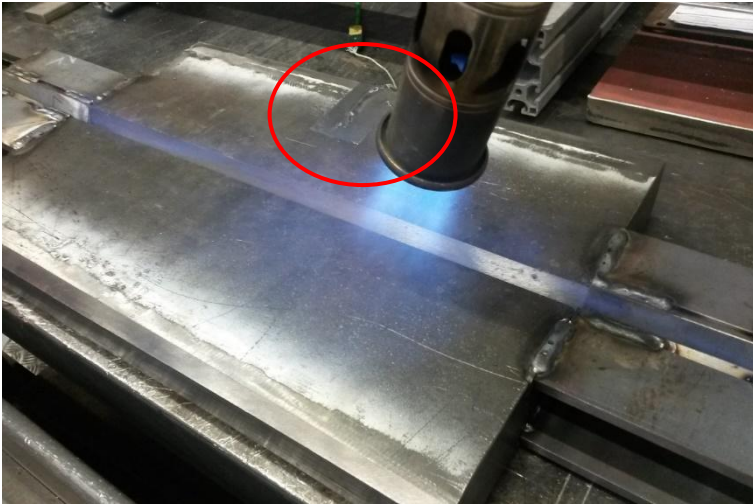
Tabelle 9 - Übersicht über die Schweißparameter

\*Startplatz in der Schweißreihenfolge

<b>Schweißstrom:</b>		Kopf 1: 300 A / Kopf 2: 300 A			
<b>Schweißspannung:</b>		Kopf 1: 30 V DC / Kopf 2: 30 V AC			
<b>Zusatzwerkstoff:</b>		Kopf 1: UP-101 NiCrMo 2,5 (S3 NiCrMo 2,5), Ø 2,4 mm (Fließ)			
<b>Schweißpulver:</b>		Kopf 2: UP-101 NiCrMo 2,5 (S3 NiCrMo 2,5), Ø 2,4 mm (Fließ)			
		OP 121 TT (Oerlikon)			
Probe	Temperatur in °C	Schweißgeschwindigkeit in m/min	Probe	Temperatur in °C	Schweißgeschwindigkeit in m/min
Probe 1 (9)*	80	0,8	Probe 6 (10)	145	0,9
Probe 2 (2)	80	1	Probe 7 (3)	105	0,76
Probe 3 (7)	135	0,8	Probe 8 (8)	105	1,04
Probe 4 (1)	135	1	Probe 9 (4)	105	0,9
Probe 5 (6)	70	0,9	Probe 10 (5)	105	0,9

Das Vorwärmen der Proben wurde mit einem handelsüblichen Propangasbrenner durchgeführt (Abbildung 33). Die Kontrolle der Temperatur erfolgte mit einem Digitalthermometer „Peak Tech ® 5110“. Der Messwert wurde über ein an der Schweißprobe angebrachtes Thermoelement übertragen (Markierung Abbildung 33). Die Aufnahme des Messwertes erfolgte in einem Bereich, der etwa 100 mm von der Schweißnaht entfernt war. So wurde sichergestellt, dass sich die Wärme gleichmäßig in der Probe verteilen konnte, bevor mit dem Schweißen begonnen wurde.





**Abbildung 33 - Vorwärmen der Schweißprobe (Markierung: Temperatureaufnahme mittels Thermoelement)**

Betrachtet man die Reaktionsgleichung der Propanverbrennung (Gleichung 5), so wird deutlich, dass es bei der Verbrennung Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und vor allem Wasser (H<sub>2</sub>O) (Abbildung 34) entstehen.



Dieses Wasser bzw. der darin enthaltene Wasserstoff kann, wenn ihm die Möglichkeit zur Diffusion gegeben wird, das Auftreten von wasserstoffinduzierten Kaltrissen begünstigen. Aus diesem Grund sollte, wenn die Vorwärmtemperatur unterhalb des Siedepunktes von Wasser (üblicherweise 100°C) gewählt wurde, eine Erwärmung des Materials (innerhalb und im angrenzenden Bereich der Schweißzone) auf eine Temperatur deutlich oberhalb des Siedepunktes erfolgen und danach empfiehlt es sich, das Werkstück an ruhender Luft wieder abkühlen zu lassen. Beschleunigtes Abkühlen verhindert, dass Wasserstoff wieder aus dem Schweißgut diffundieren kann. Somit wird das Auftreten von wasserstoffinduzierten Querrissen begünstigt. Auch spielt der diffusive Wasserstoffgehalt des verwendeten Zusatzwerkstoffes eine wesentliche Rolle bei der Entstehung von Kaltrissen.

Muss die Schweißung des Bauteiles unterbrochen werden, empfiehlt es sich, für die Zeit der Unterbrechung die Wärme im Bauteil zu halten. Dies kann beispielsweise durch elektrische Induktions- bzw. Widerstands-Heizgeräte (Heizmatten) erfolgen. Natürlich können diese Gerätschaften auch zum Vorwärmen eingesetzt werden.



**Abbildung 34 - Bildung von Wasser auf der Blechoberfläche während des Vorwärmens**

Das Schweißen der Proben erfolgte in randomisierter Reihenfolge. Wie auch schon im vorangegangenen Praktikumsversuch wurden durch das Schweißen in zufälliger Reihenfolge systematische Fehler vermieden.

## **5.2.2 Auswertung der Vorversuche**

Gerade bei hochfesten, flüssigkeitsvergüteten Feinkornbaustählen ist eine verzögerte Rissbildung, hervorgerufen durch den über das Schweißen eingebrachten Wasserstoff, nicht auszuschließen. Daher wurde bei jeder Schweißprobe eine Wartezeit von mindestens 48 h eingehalten [28].

Die zerstörungsfreien Prüfungen wurden durch Personal durchgeführt, welches nach DIN EN ISO 9712 zertifiziert war.

Die Herstellung der Proben und die Durchführung der zerstörungsfreien und zerstörenden Prüfungen erfolgten nach den jeweiligen gültigen Normen. Die einzelnen Abläufe der Prüfschritte sind in Abschnitt 5.1 näher erläutert. Sämtliche Prüfprotokolle sind im Teil 2 der Anlagen aufgeführt.

### **5.2.2.1 Zerstörungsfreie Prüfungen**

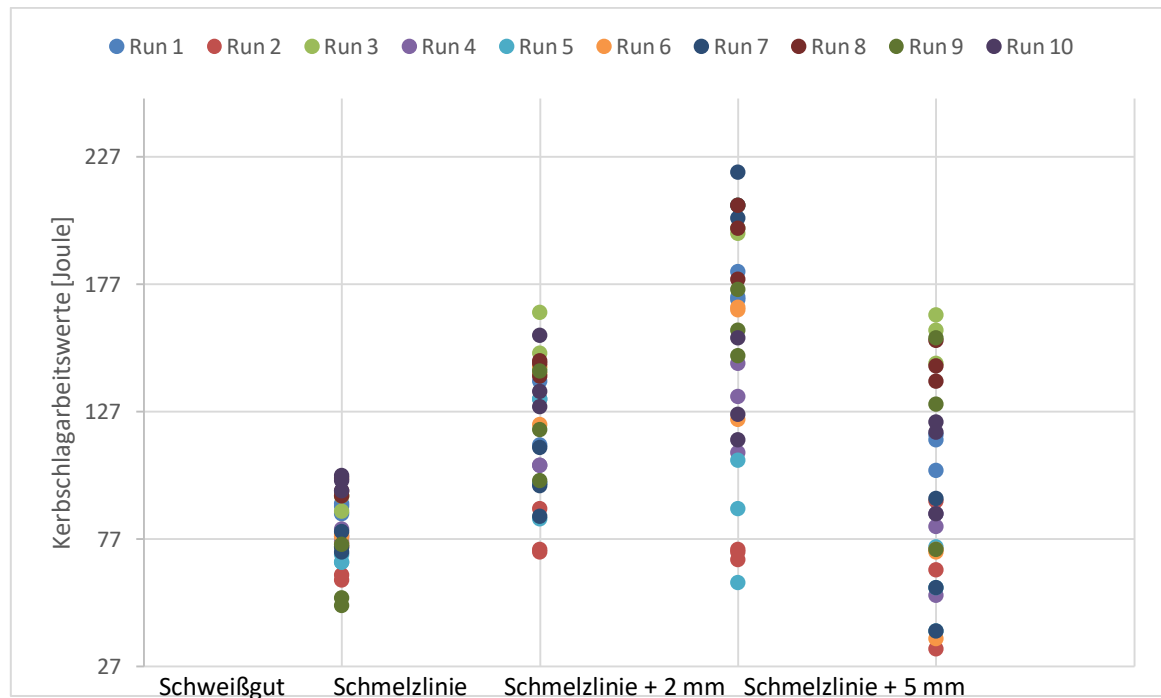
Für die Vorversuche wurden als Prüfumfang eine Sichtprüfung, eine Oberflächenrissprüfung (hier: Magnetpulverprüfung) und eine Volumenprüfung (hier: Ultraschallprüfung) festgelegt. Die Sichtprüfung und die Oberflächenrissprüfung ergaben keine Unregelmäßigkeit. Während der Ultraschallprüfung wurden Anzeigen in den Werkstücken detektiert.

Als Prüfungsfang wurden ein Zugversuch, eine Härteprüfung nach Vickers und eine makroskopische und mikroskopische Untersuchung festgelegt. Die Prüfungen wurden durch qualifiziertes Personal der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt Mecklenburg-Vorpommern GmbH durchgeführt. Von ausgewählten Proben wurden Mikroschliffe entnommen, um Aussagen über Gefügeausbildungen treffen zu können. Die Wahl fiel auf Probe 5 (geringste Vorwärmtemperatur), Probe 6 (höchste Vorwärmtemperatur), Probe 7 (langsamste Schweißgeschwindigkeit), Probe 8 (schnellste Schweißgeschwindigkeit) und Probe 9 (Nulldurchgang).

Grundlage für die folgenden Diagramme bildet Tabelle 8. Wie unter Abschnitt 5.2.1 schon erwähnt, stammen die Kerbschlagarbeitswerte aus dem vorangegangenen Praktikumsversuch. Der Minimalwert der Ordinate stellt hier die Mindestforderung an die Kerbschlagarbeit bei  $-40^{\circ}\text{C}$  dar [1]. Deutlich wird bei dieser Darstellung eine Zunahme der Streuung der Werte, je weiter sich die Kerblage der Probe von der Schmelzlinie entfernt.

The scatter plot displays the Kerbschlagarbeitswerte (Joule) for 10 different runs across four categories. The y-axis represents the energy value in Joules, ranging from 27 to 227. The x-axis categories are Schweißgut, Schmelzlinie, Schmelzlinie + 2 mm, and Schmelzlinie + 5 mm. Each run is represented by a different colored dot. Run 10 (dark purple) consistently shows higher values than the other runs, particularly in the 'Schmelzlinie + 5 mm' category where it reaches approximately 227 Joules. The 'Schweißgut' category shows the lowest overall values, while 'Schmelzlinie + 5 mm' shows the highest.

Run	Schweißgut	Schmelzlinie	Schmelzlinie + 2 mm	Schmelzlinie + 5 mm
Run 1	~80	~110	~120	~80
Run 2	~70	~80	~70	~140
Run 3	~90	~140	~150	~180
Run 4	~75	~130	~110	~90
Run 5	~85	~115	~130	~110
Run 6	~70	~90	~140	~180
Run 7	~80	~100	~180	~210
Run 8	~100	~120	~170	~70
Run 9	~110	~150	~160	~190
Run 10	~120	~160	~200	~227

**Diagramm 2 - Verteilung der Kerbschlagarbeitswerte (Blechmitte)***(Darstellung ohne Mittelwerte)***5.2.2.2.2 Zugversuch**

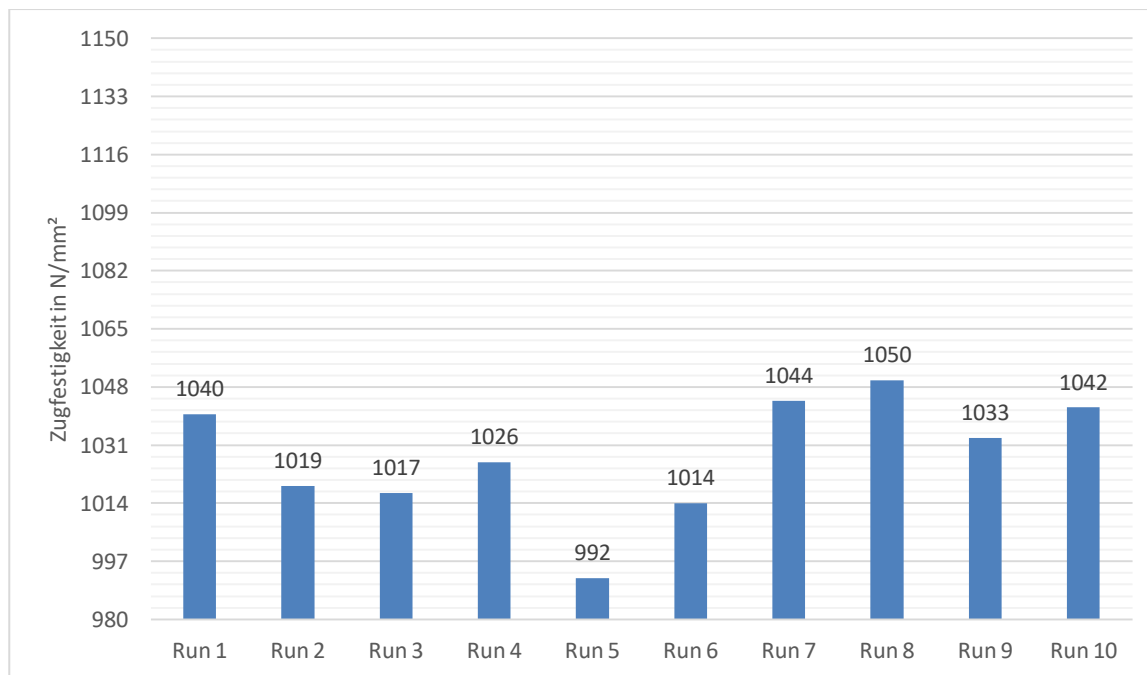
Die nachfolgende Tabelle 10 zeigt die für die Statistik relevanten Ergebnisse der Vorversuche. Es sei angemerkt, dass für die Qualifizierung eines Schweißverfahrens die erreichte Streck- bzw. Dehngrenze nur informativ ist. Die hier aufgezeigten Werte dienen lediglich der Information. Anders verhält es sich bei der Zugfestigkeit: Die in Tabelle 10 aufgelisteten Grenzwerte sind bindend. Die einzelnen Prüfprotokolle können im Anhang Teil 2 eingesehen werden.

**Tabelle 10 - Ergebnisse der Zugversuche aus den Vorversuchen**

Probe-Nr.	Abmessungen mm x mm	0,2% Dehngrenze Rp0,2 in N/mm <sup>2</sup> ≥ 960 N/mm <sup>2</sup>	Zugfestigkeit Rm in N/mm <sup>2</sup> 980 - 1150 N/mm <sup>2</sup>	Maximalkraft F <sub>max</sub> in kN
Probe 1	20,0 x 19,9	972	1040	414,85
Probe 2	20,0 x 19,8	956	1019	403,18
Probe 3	20,0 x 19,8	936	1017	401,55
Probe 4	20,0 x 19,7	948	1026	404,39
Probe 5	20,0 x 19,8	957	992	391,68
Probe 6	20,0 x 19,8	938	1014	401,37
Probe 7	20,0 x 19,8	961	1044	413,20
Probe 8	20,0 x 20,0	967	1050	420,30
Probe 9	20,0 x 19,8	964	1033	408,15
Probe 10	20,0 x 19,8	960	1042	411,58

Das nachfolgend dargestellte Diagramm 3 veranschaulicht die erreichten Zugfestigkeiten  $R_m$  in  $N/mm^2$ . Der Minimal- und der Maximalwert auf der Ordinate entsprechen der Forderung der DIN EN ISO 10025-6. Deutlich wird, dass die höchsten Werte bei einer mittleren Vorwärm- und Zwischenlagentemperatur von  $105^\circ C$  erreicht wurden.

**Diagramm 3 - Mittelwerte der Zugfestigkeit in  $N/mm^2$**



#### **5.2.2.2.3 Härteprüfung nach Vickers**

Die Härteprüfung wurde an einem stationären Prüfgerät der Marke Zwick und Roell durchgeführt (Abbildung 35). Da es gemäß DIN EN ISO 15614-1 keine Vorgaben für eine maximale Härte gibt, wurde im Vorab eine Obergrenze von 450 HV10 festgelegt. Dies entspricht der Maximalhärte für Stähle der gleichen Werkstoffgruppe, jedoch werden in der DIN EN ISO 15614-1 nur Stähle bis zu einer Streckgrenze von  $890 N/mm^2$  berücksichtigt. Die Prüfkraft betrug für den gesamten Prüfumfang 98 N. Die Härtemessung erfolgte in drei Reihen (1x Bereich der Decklage der zuletzt geschweißten Seite, 1x Bereich der Wurzellage, 1x Bereich der Decklage der zuerst geschweißten Seite) zu je 15 Messpunkten. Nähere Erläuterungen werden unter Abschnitt 5.1.8 gegeben. In Abbildung 36 wird beispielgebend am Makroschliff von Probe 10 die Lage der Härteeindrücke gezeigt.

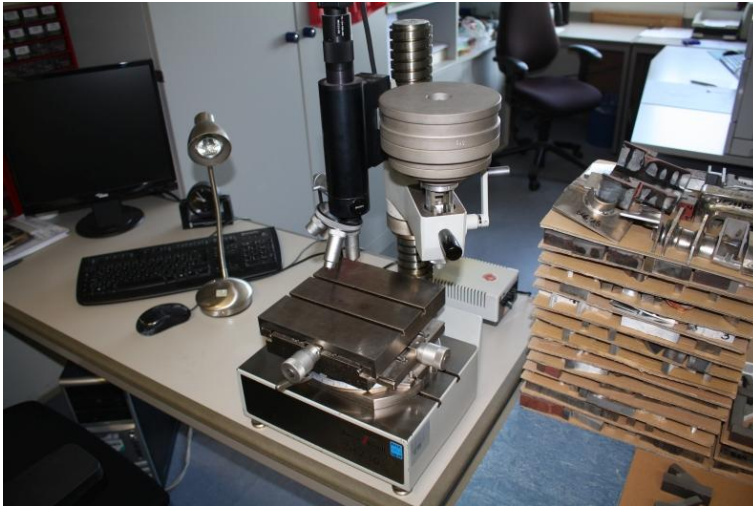


Abbildung 35 - Härteprüfmaschine ZHV 10 (Hersteller: Zwick & Roell)

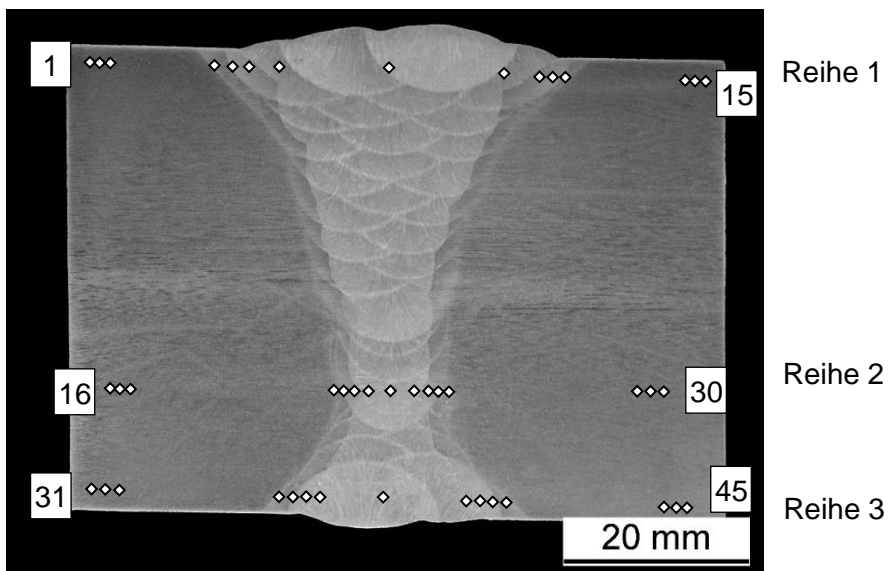
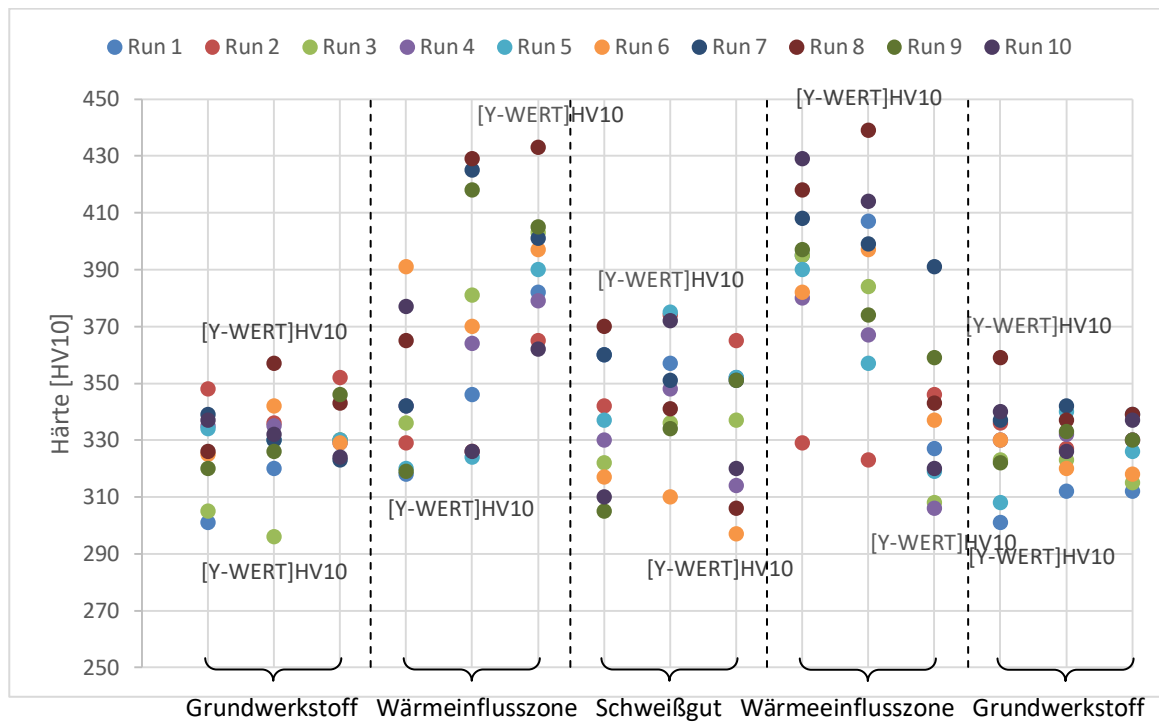
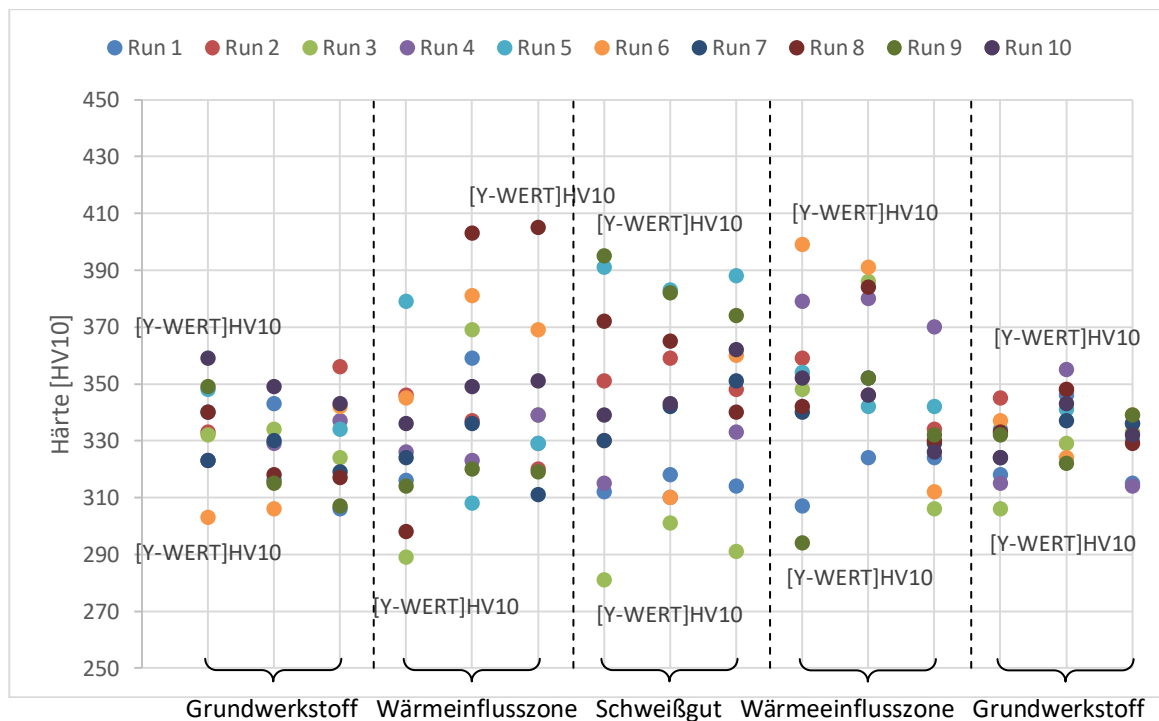
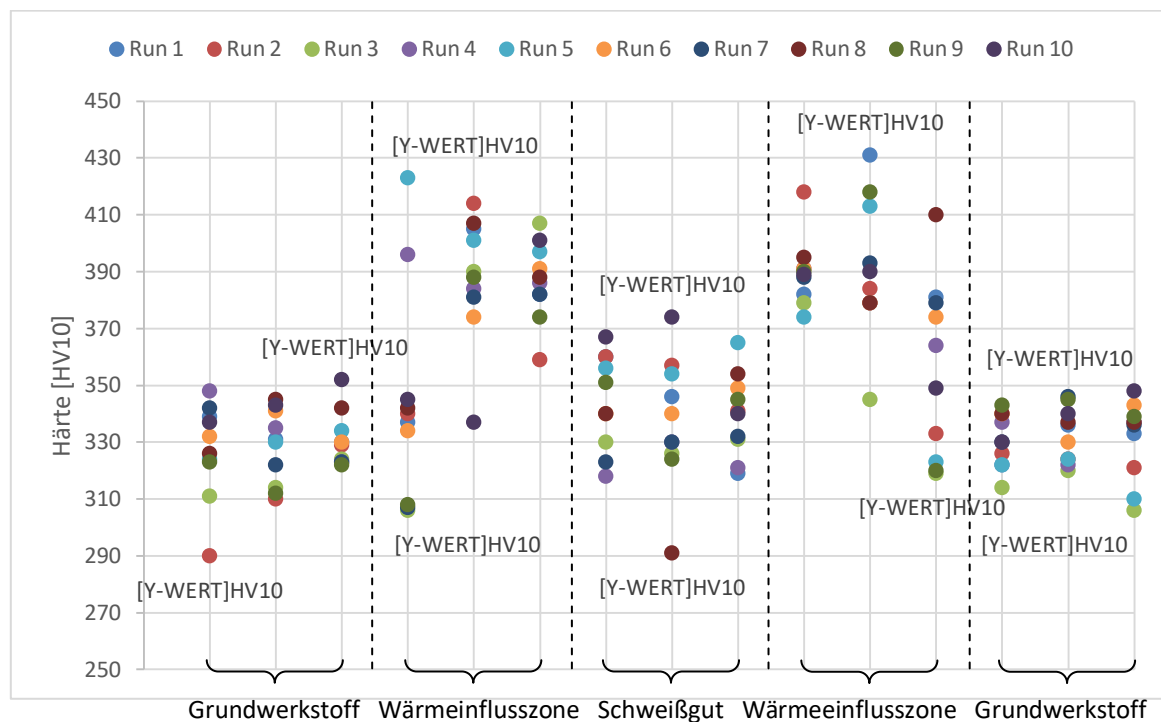


Abbildung 36 - Lage der Härteeindrücke im Makroschliff

Aus Gründen der Übersichtlichkeit erscheint an dieser Stelle keine Tabelle mit den 450 einzelnen Härtewerten. Die nachfolgenden Diagramme geben Aufschluss über die Verteilung der Härte in den einzelnen relevanten Bereichen (der angegebene Höchstwert der Ordinate entspricht der festgelegten Maximalhärte). Aufgelistet werden die jeweiligen Minimal- und Maximalwerte je Zone. Die einzelnen Protokolle können im Anhang Teil 2 eingesehen werden.

**Diagramm 4 - Verteilung der Härtewerte (Decklage oben)****Diagramm 5 - Verteilung der Härtewerte (Wurzellage)**



**Diagramm 6 - Verteilung der Härtewerte (Decklage unten)**

Bei Betrachtung der Diagramme der einzelnen Härtereihen fällt auf, dass es im oberflächennahen Bereich innerhalb der Wärmeeinflusszone zu einem Anstieg der Härte kommt. Dieses hängt mit den schnellen Abkühlzeiten zusammen. Wird bei Versuchen eine zu hohe Aufhärtung festgestellt, steigt die Gefahr eines Zähigkeitsverlustes. Diesem kann man durch gesteuerte verzögerte Abkühlung entgegenwirken. In der Blechmitte, bzw. im Bereich der Wurzellage ist eine geringere Aufhärtung im Vergleich zur oberflächennahen Bereich zu beobachten. Dies hängt mit sogenannten Anlassseffekten zusammen. Genau wie bei einem Vergütungsverfahren wird eine zu hohe Aufhärtung im Bereich der Wärmeeinflusszone durch mehrfache Wärmebehandlung rückgängig gemacht.



#### 5.2.2.2.4 Makroskopische und mikroskopische Untersuchung

Von allen Proben wurden Makroschliffe angefertigt. Die Herstellung der Schliffe wurde auf rotierenden Speziialschleifmaschinen ausgeführt. Das Schleifen der Proben erfolgte in mehreren Stufen mit unterschiedlichen Körnungen. Diese variieren je nach Werkstoff. Bei Stählen schleift man üblicherweise in 5 Stufen: 80er, 120er, 240er, 400er und 600er Körnung. Die Schleifarbeiten wurden auf einem metallographischen Nassschleifgerät (Abbildung 37) ausgeführt. Bei Betrachtung der ungeätzten Probenoberfläche konnte man bereits eine leichte Reliefbildung erkennen. Dafür verantwortlich sind Gefügebestandteile mit unterschiedlicher Härte. Je größer die Unterschiede sind, desto deutlicher lässt sich der grobe Aufbau der Schweißnaht bereits ohne vorheriges Ätzen erkennen. Um genauere Aussagen über die Beschaffenheit des Gefüges machen zu können, muss die Schlifffläche mittels ausgewählter Ätzverfahren kontrastiert werden. Das hat den Vorteil, dass der Aufbau und die Bestandteile eines Gefüges in der präparierten Ebene mit dem bloßen Auge erkennbar und somit auch zu unterscheiden sind. Das Ätzverfahren, welches für die Makroschliffe angewandt wurde, verändert die Schlifffläche der Schweißprobe nicht und zählt somit zu den optischen Ätzverfahren. Andere Verfahren, welche die Schliffebene verändern, werden in elektrochemische (Anlassätzen, Lösungsätzen, Niederschlagätzen) und physikalische (Ionenätzen, Aufbringen von Interferenzschichten, thermisches Ätzen) Ätzverfahren unterteilt. Die Ätzzeiten können sehr unterschiedlich sein und variieren von „kurzem Eintauchen“ bis hin zu einer Einwirkzeit von mehreren Stunden. Wie lange eine Probe geätzt werden muss, hängt im Wesentlichen vom Werkstoff, von der Konzentration des Ätzmittels und von der Ätztemperatur ab [25].

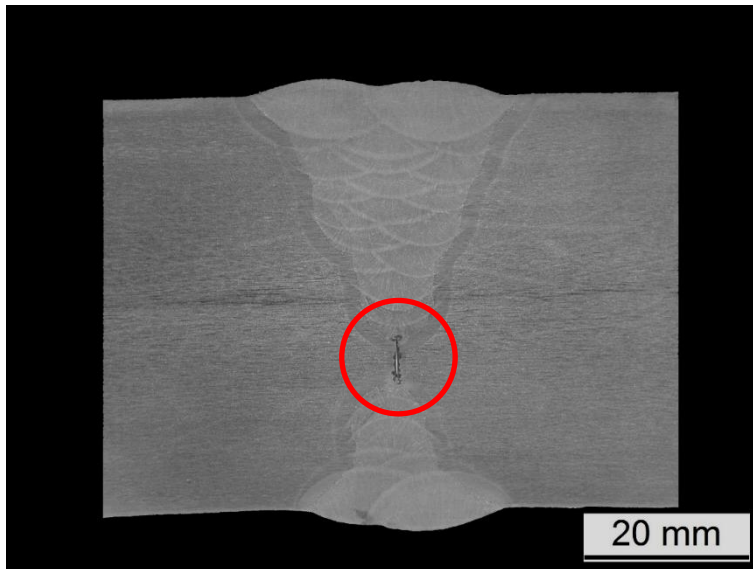


**Abbildung 37 - Manuelles metallographisches Nassschleifgerät (Hersteller: Buehler)**

Die Sichtbarmachung des Gefüges der Makroschliffe erfolgte mit dem Ätzverfahren nach Adler. Dies ist ein Ätzmittel auf der Basis von Wasser, Eisen-III-Chlorid und Salzsäure. Das Auftragen wurde nach dem letzten Schleifdurchgang bei Raumtemperatur mit einem Schwamm oder etwas Vergleichbarem vorgenommen. Das Ätzmittel wurde per Wischen oder Tupfen aufgebracht. War der Kontrast der Schlifffläche stark genug, wurde das über-

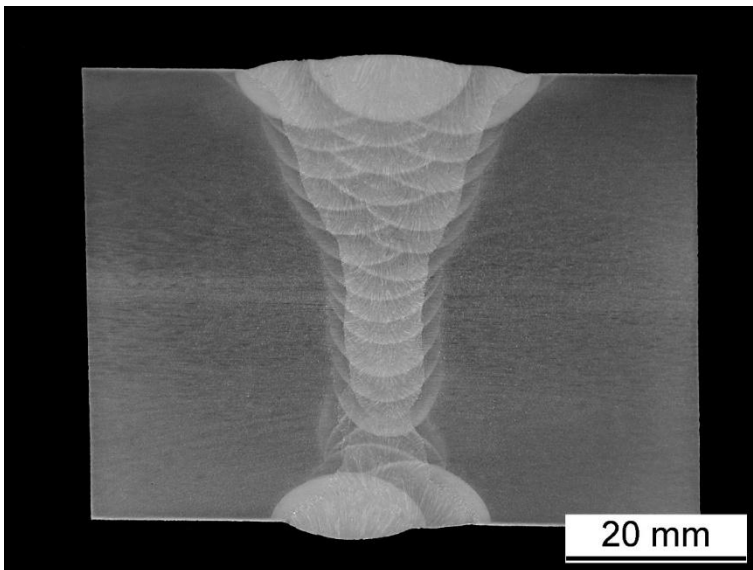
schüssige Ätzmittel mit Wasser abgespült, die Schlifffläche mit Ethanol gereinigt und unter einem Warmluftgebläse getrocknet. Danach konnte die Begutachtung der Probe erfolgen.

Die zu Beginn der Versuchsreihe geschweißte Probe ist in Abbildung 38 dargestellt. Die Markierung zeigt eine ungenügende Durchschweißung. Bei genauerer Betrachtung fällt auf, dass der Schweißstrom von 300 A nicht ausreichte, um den Steg komplett oder auch nur zum Teil anzuschmelzen. Bei der zerstörungsfreien Volumenprüfung wurde diese Unregelmäßigkeit detektiert.

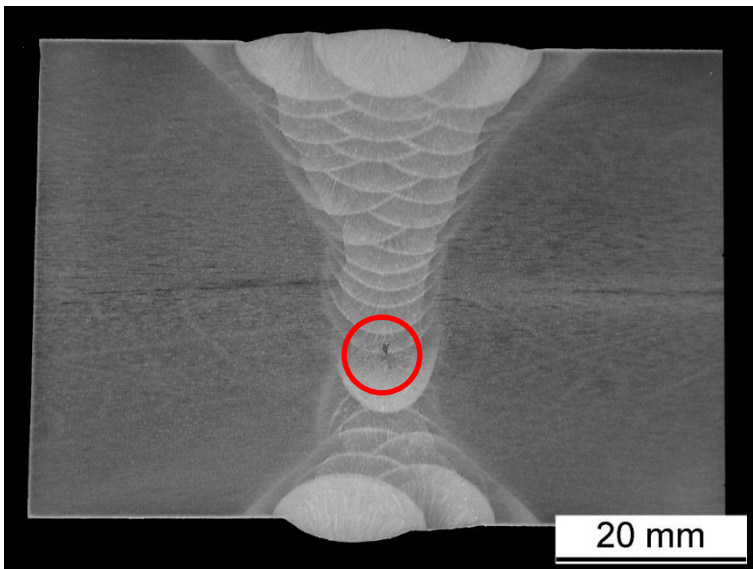


**Abbildung 38 - Makroschliff des ersten Schweißversuches (Markierung: Unregelmäßigkeit gemäß DIN EN ISO 5817: ungenügende Durchschweißung)**

Um diesem Fehler vorzubeugen, wurde bei den Folgeversuchen der Steg nach dem Schweißen der Unterseite komplett ausgeschliffen und im Anschluss mit Schweißgut aufgefüllt. Abbildung 39 zeigt den Makroschliff von Probe 1. Durch das Ausschleifen des Steges verlagerte sich die Wurzelschweißung um ca. 5 - 7 mm in Richtung der Unterseite. Eine mittels Ultraschallprüfung festgestellte Unregelmäßigkeit wurde im Makroschliff der Probe 5 sichtbar gemacht (Abbildung 40). Hierbei handelt es sich um einen Schlackeeinschluss. Die Länge der Unregelmäßigkeit betrug 20 mm. Die Höhe von 1,25 mm konnte im Makroschliff ermittelt werden. Somit handelt es sich um eine gemäß DIN EN ISO 5817 - Bewertungsgruppe B zulässige Unregelmäßigkeit (Ordnungsnummer 301). Unzulässig wäre dieser Schlackeeinschluss bei einer Länge von mehr als 25 mm und einer Höhe von mehr als 2 mm [26]. Die Makroschliffbilder der Proben 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9 und 10 sind Bestandteil der Anlage Teil 2.



**Abbildung 39 - Makroschliff Probe 1 (Ätzung: nach Adler)**



**Abbildung 40 - Makroschliff Probe 5 (Ätzung: nach Adler)**

**Markierung: Schlackeeinschluss zwischen Schweißraupe 1 und 2 der Oberseite**

Wie bereits unter Abschnitt 5.2.2.2 vermerkt, wurden von ausgewählten Proben Mikroschliffe angefertigt:

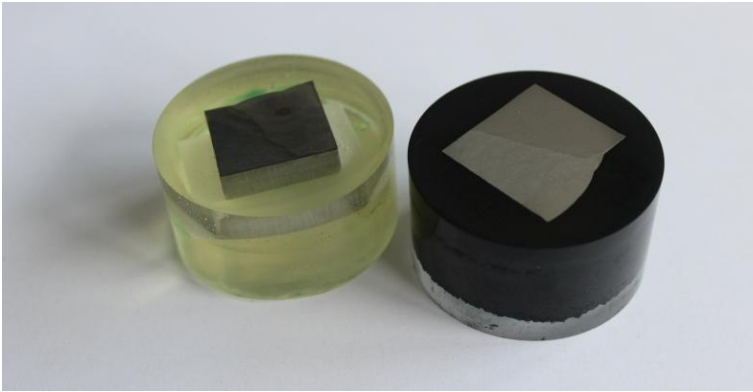
- Probe 5 (geringste Vorwärmtemperatur)
- Probe 6 (höchste Vorwärmtemperatur)
- Probe 7 (langsamste Schweißgeschwindigkeit)
- Probe 8 (schnellste Schweißgeschwindigkeit)
- Probe 9 (Nulldurchgang)

Ähnlich wie bei der Präparation von Makroschliffen erfolgte das Schleifen der Probenoberfläche in mehreren Stufen. Im Unterschied zu den bereits bekannten Arbeitsgängen wur-

den die Mikroschliffe zur besseren Handhabung eingebettet, d.h., die Proben wurden mit einem speziellen Kunststoff unter der Einwirkung eines definierten Druckes und definierter Hitze in einer Warmeinbettpresse (Abbildung 41) handhabbar gemacht (Abbildung 42). Probenhalter in halbautomatischen metallographischen Nassschleifmaschinen ermöglichten die gleichzeitige Bearbeitung mehrerer Proben (Abbildung 43). Nach dem Schleifen bis zu einer Körnung von etwa 1000 wurden die Mikroschliffe poliert. Das Polieren wurde in drei Durchgängen auf speziellen Poliertüchern vollzogen. Durchgang 1 polierte die Proben mit einer Diamantsuspension, die einen Korndurchmesser von 9  $\mu\text{m}$  hat. Im 2. Durchgang wurde die Korngröße auf 3  $\mu\text{m}$  verkleinert. Der finale Poliergang wurde mit einer Suspension Korngröße < 3  $\mu\text{m}$  durchgeführt. Die Betrachtung der präparierten Mikroschliffe erfolgte im ungeätzten (Ausscheidungen) und im geätzten (Gefügestruktur) Zustand. Geätzt wurden die Proben mit Nital (Ätzmittel auf der Basis von Ethanol und Salpetersäure). Die Ätzzeit betrug nur wenige Sekunden. Die Proben wurden kurz in eine Petrischale, die mit Nital befüllt war, getaucht und im Anschluss wieder mit Wasser und Ethanol gereinigt.



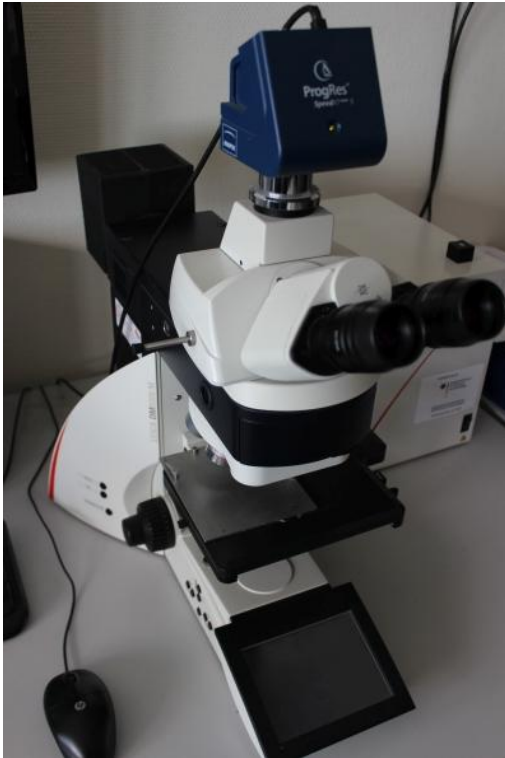
**Abbildung 41 - Warmeinbettpresse LaboPress-3 (Hersteller: Struers)**



**Abbildung 42 - präparierte Mikroschliffe in transparenter und schwarzer Einbettmasse**



**Abbildung 43 - Halbautomatische metallographische Nassschleif- und Poliermaschine (Hersteller: Struers)**

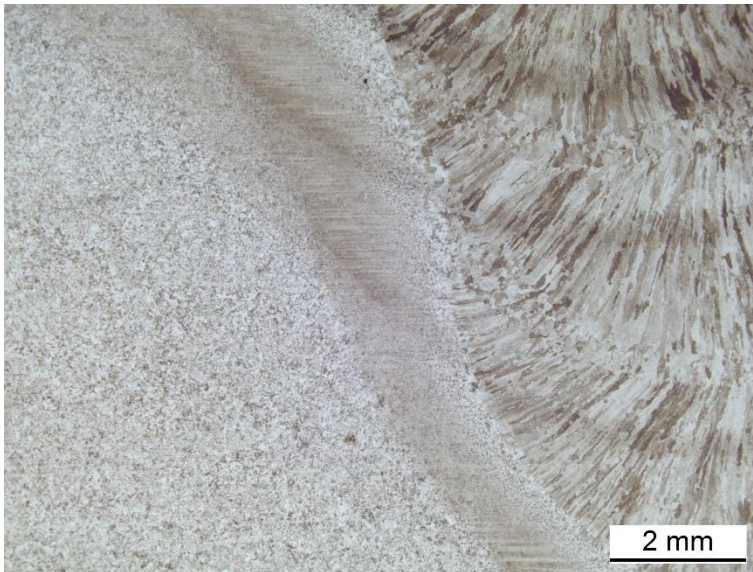


**Abbildung 44 - Auflichtmikroskop Leica DM6000M**

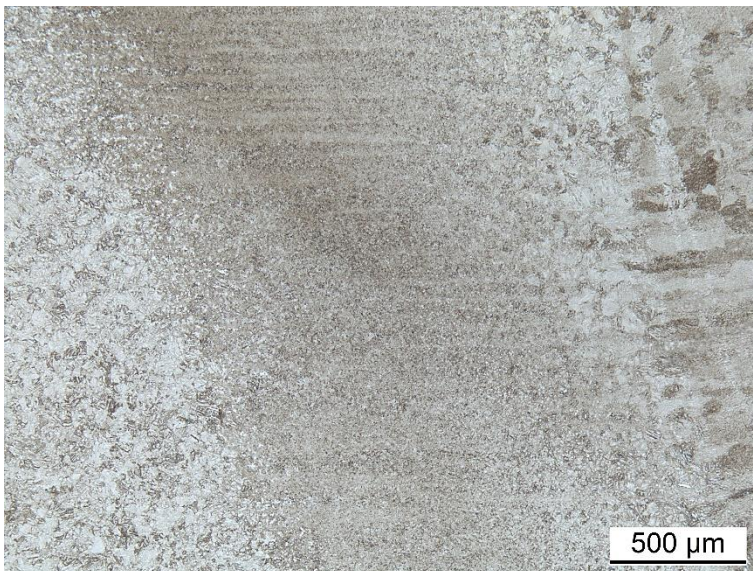
Bei der mikroskopischen Untersuchung nach DIN EN ISO 17639 wurden hauptsächlich die Kornstruktur und die Korngrenzen der Schweißproben untersucht. Bei einer Verfahrensprüfung nach DIN EN ISO 15614-1 werden die Schweißnaht (Abbildung 47), die Wärmeeinflusszone (Abbildung 48, Abbildung 49, Abbildung 50) und der unbeeinflusste Grundwerkstoff

Abbildung 51) mikroskopisch bewertet. Die Betrachtung der Mikroschliffe erfolgte unter einem Auflichtmikroskop (Abbildung 44). Exemplarisch werden an dieser Stelle die Mikroschliffbilder von Run 5 gezeigt. Die Aufnahmen der Runs 6 bis 9 können in den Anlagen Teil 2 eingesehen werden. Die charakteristischen Merkmale der verschiedenen Zonen der Schweißverbindungen werden unter Abschnitt 5.3.2.5 bei der Auswertung des Hauptversuches näher erläutert.



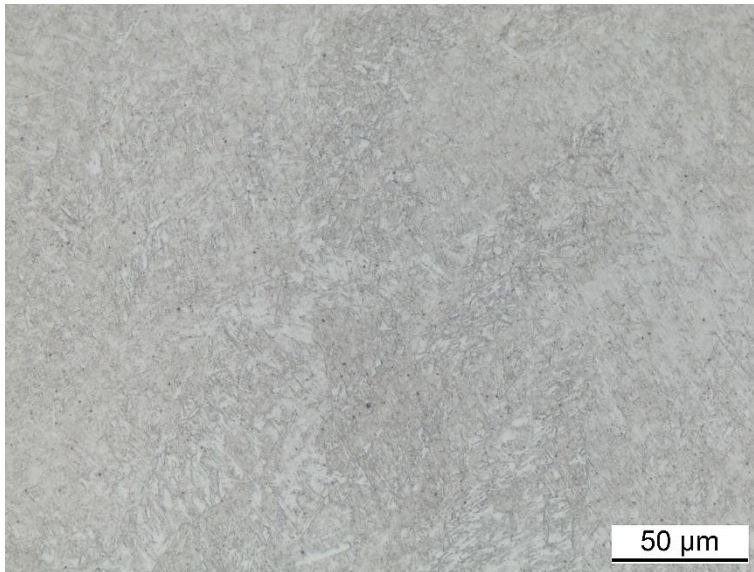


**Abbildung 45 - Mikroschliff Run 5: Übersicht Schweißverbindung 12,5-fach (Ätzung: Nital)**

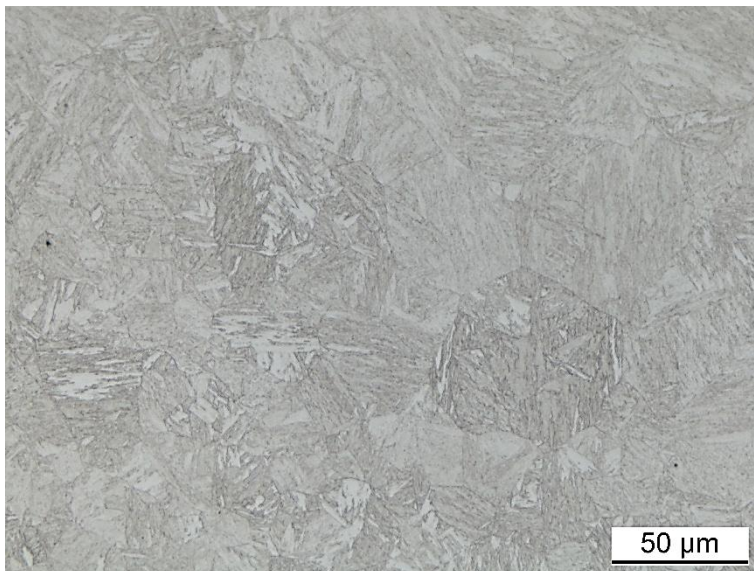


**Abbildung 46 - Mikroschliff Run 5: Übersicht Schweißverbindung 50-fach (Ätzung: Nital)**

Die Übersichtsaufnahmen dienen vor allem dazu, sich einen genauen Überblick von der Beschaffenheit des Schweißgutes, der Wärmeeinflusszone und des angrenzenden Grundwerkstoffes zu verschaffen. Bereits hier können Unregelmäßigkeiten wie Risse oder Fremdkörpereinschlüsse detektiert werden. Für eine genauere Untersuchung der einzelnen Abschnitte der Schweißnaht kommen höhere Vergrößerungen zum Einsatz.



**Abbildung 47 - Mikroschliff Run 5: Schweißgut 500-fach (Ätzung: Nital)**

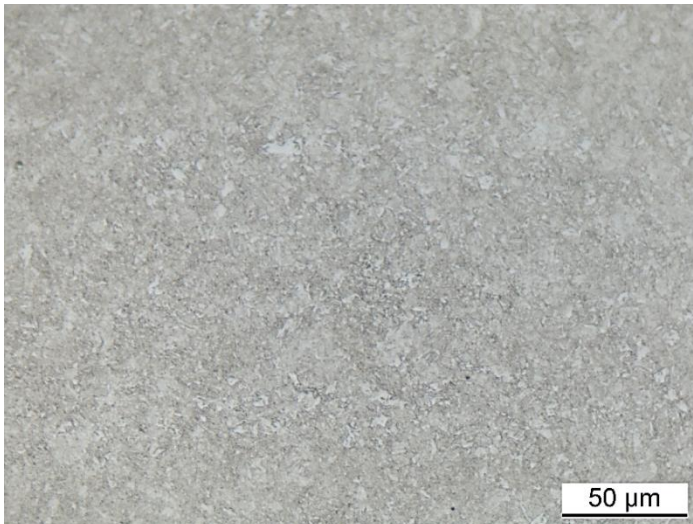


**Abbildung 48 - Mikroschliff Run 5: Grobkornzone 500-fach (Ätzung: Nital)**

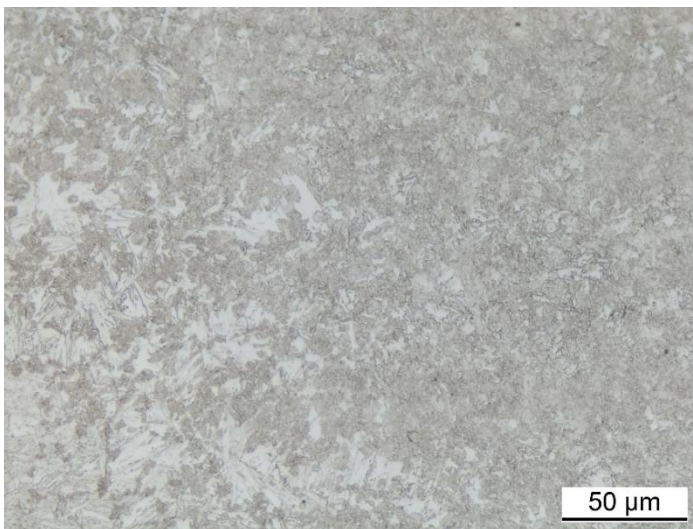
Bei Vergrößerungen, wie sie in Abbildung 47 bis

Abbildung 51 dargestellt sind, können genaue Angaben zur Gefügeausbildung getroffen werden. Es wurden die einzelnen Bereiche der Wärmeeinflusszone (Grobkornzone (Abbildung 48), Feinkornzone (Abbildung 49), Zone der teilweisen Gefügeumwandlung (Abbildung 50)) bei 500-facher Vergrößerung auf Unregelmäßigkeiten untersucht.

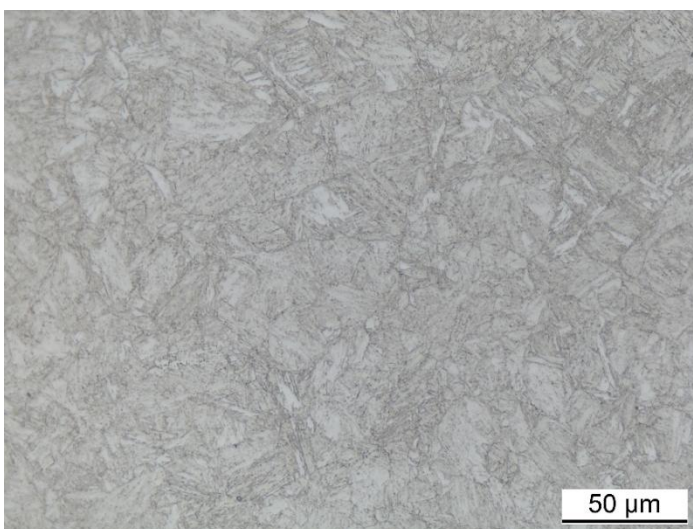




**Abbildung 49 - Mikroschliff Run 5: Feinkornzone 500-fach (Ätzung: Nital)**



**Abbildung 50 - Mikroschliff Run 5: Zone der teilweise Gefügeumwandlung 500-fach (Ätzung: Nital)**



**Abbildung 51 - Mikroschliff Run 5: Grundwerkstoff 500-fach (Ätzung: Nital)**

### 5.2.2.3 Statistische Auswertung der erreichten Zugfestigkeiten

Analog zu den Kerbschlagbiegeversuchen wurde mit den erreichten Zugfestigkeiten eine statistische Auswertung vorgenommen. Zur Anwendung kam hierbei die Softwarelösung Statistica® von der Firma StatSoft, einem Softwarepaket, das die statistische und grafische Analyse von Datenmaterial auf der Basis von MS Excel erlaubt.

Genutzt wurde das gleiche Modell wie in Abschnitt 5.2.1 beschrieben.

*Unabhängige Variablen (gemäß Abbildung 32 und Tabelle 9):*

- Zwischenlagentemperatur
- Tandemgeschwindigkeit

*Abhängige Variable:*

- Zugfestigkeit in N/mm<sup>2</sup>

Bei der Ausführung der Schweißversuche war die Versuchsreihenfolge unbedingt einzuhalten, um systematische Fehlerquellen auszuschließen.

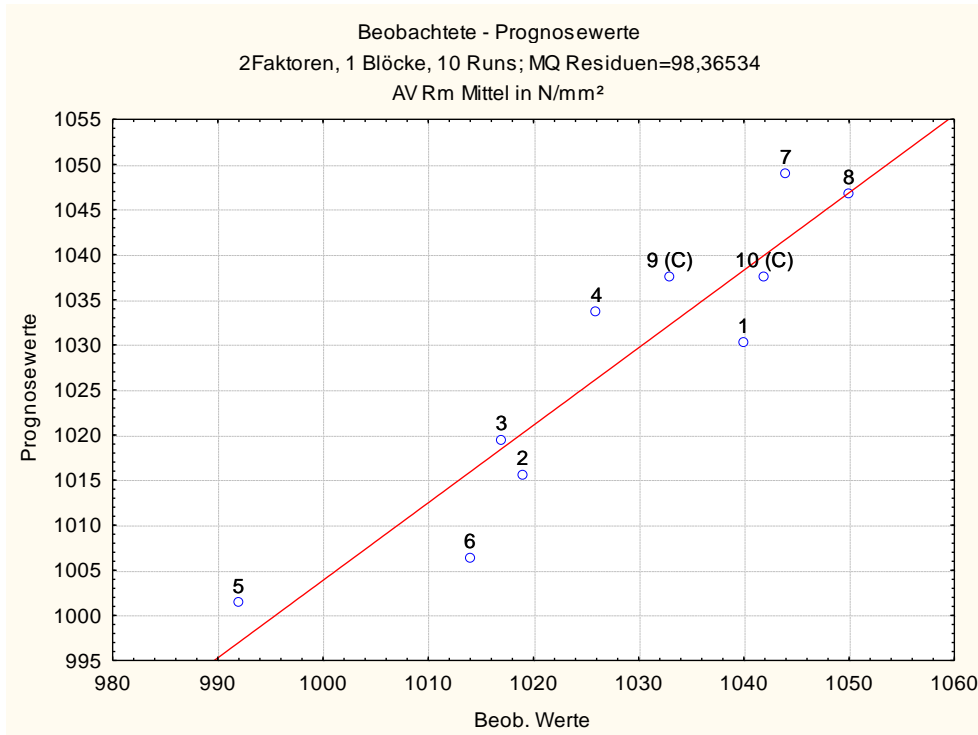
Tabelle 11 zeigt den Versuchsplan mit der durch die Software angepassten Versuchsreihenfolge:

**Tabelle 11 - Übersicht Schweißreihenfolge und -parameter**

lfd. Nr.	Probe	Zwischenlagentemperatur	Tandemgeschwindigkeit
1	Run 4	135°C	1,0 m/min
2	Run 2	80°C	1,0 m/min
3	Run 7	105°C	0,76 m/min
4	Run 9	105°C	0,9 m/min
5	Run 10	105°C	0,9 m/min
6	Run 5	70°C	0,9 m/min
7	Run 3	135°C	0,8 m/min
8	Run 8	105°C	1,04 m/min
9	Run 1	80°C	0,8 m/min
10	Run 6	145°C	0,9 m/min

Das Schweißen der statistischen Versuchsserie wurde wie unter Abschnitt 5.2.1 beschrieben durchgeführt. Alle Schweißungen wurden entsprechend der Run-Nummer gekennzeichnet. Die Entnahme der Zugproben erfolgte nach dem in Abbildung 30, Abschnitt 5.1.4 gezeigten Schema. Die Zugversuche wurden durch geschultes Personal der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt Mecklenburg-Vorpommern an einem Tag durchgeführt.

Der erste Vergleich der ermittelten Zugfestigkeiten zu den durch das Modell prognostizierten Zugfestigkeiten zeigt ein unbestimmtes Bild (Abbildung 52). Bei guter Übereinstimmung sollten die beobachteten Werte mit leichten Abweichungen an der roten Linie verteilt sein.



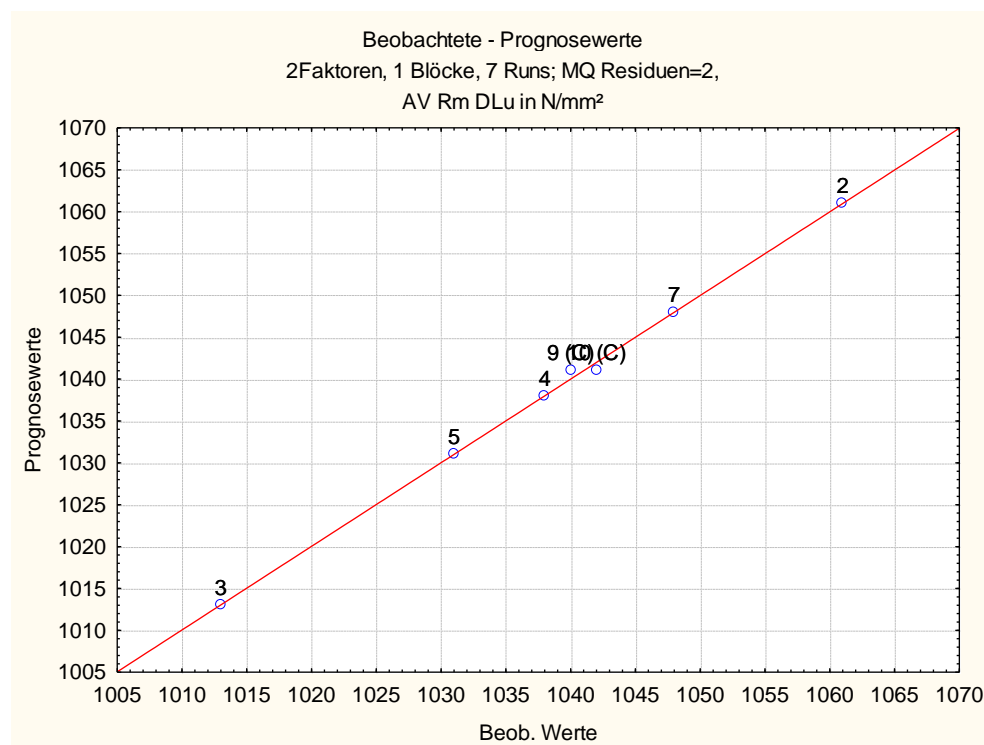
**Abbildung 52 - Ermittelte Zugfestigkeiten, Vergleich beobachtete Werte - Prognosewerte (Auszug aus dem Programm Statistica®)**

Die Effektschätzung bestätigt diesen Eindruck (Tabelle 12). Die Zugfestigkeit ist nur zu 64 %, angegeben durch das korrigierte Bestimmtheitsmaß  $R^2_{\text{kor}}$  auf die Wirkung der Eingangsgrößen zurückzuführen. Das Modell berechnet dabei sowohl die linearen (L) und quadratischen (Q) Effekte der einzelnen Parameter als auch die Effekte aus den Interaktionen der linearen Einzeleffekte. Interaktionen stellen dar, wie sich Effekte von Einzelparametern in Abhängigkeit von anderen Einzelparametern verändern und ob dort starke Beeinflussungen auf die jeweilige Messgröße nachgewiesen werden können. Statistisch nachweisbare Effekte werden in roter Schriftfarbe dargestellt. Allerdings sind diese signifikanten Effekte immer im Zusammenhang mit dem Bestimmtheitsmaß zu betrachten.

**Tabelle 12 - Effektschätzung des Einflusses der Eingangsparameter auf das Ergebnis Zugfestigkeit (Auszug aus dem Programm Statistica®)**

Effektschätzung; Var.:Rm Mittel in N/mm²; R² = ,85958; korr=,68406 (S960Qneu.sta) 2Faktoren, 1 Blöcke, 10 Runs; MQ Residuen=98,36534 AV Rm Mittel in N/mm²										
Faktor	Effekt	Std.	t(4)	p	-95,% Konf.G r.	+95,% Konf.G r.	Koeff.	Std. Koeff.	-95,% Konf.G r.	+95,% Konf.G r.
MW/Konstante	1037,760	7,047	147,257	0,0000	1018,19	1057,33	1037,76	7,047	1018,19	1057,33
(1)Zwischenlagentemperatur in °C(L)	3,662	7,138	0,513	0,6349	-16,16	23,48	1,83	3,569	-8,08	11,74
Zwischenlagentemperatur in °C(Q)	-36,468	9,846	-3,704	0,0208	-63,81	-9,13	-18,23	4,923	-31,90	-4,57
(2)Tandemgeschwindigkeit in m/min(L)	-0,221	7,027	-0,031	0,9764	-19,73	19,29	-0,11	3,514	-9,87	9,65
Tandemgeschwindigkeit in m/min(Q)	10,354	9,207	1,125	0,3237	-15,21	35,92	5,18	4,604	-7,61	17,96
1L * 2L	14,475	9,898	1,462	0,2174	-13,01	41,95	7,24	4,949	-6,50	20,98

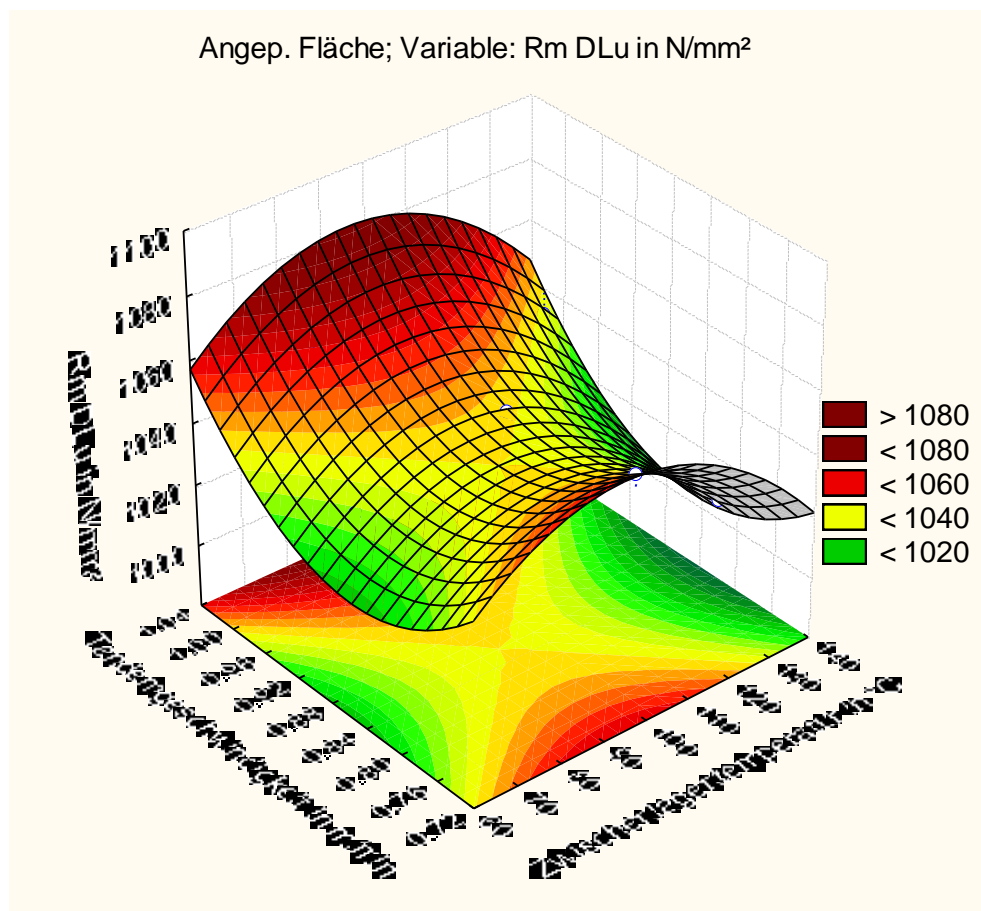
Nach dem Ausschluss von Probe 1, Probe 6 und Probe 8 als sogenannte Ausreißer (Abbildung 53) stieg das korrigierte Bestimmtheitsmaß  $R^2_{\text{kor}}$  auf 99,08 % (Tabelle 13).

**Abbildung 53 - Ermittelte Zugfestigkeiten, Vergleich beobachtete Werte - Prognosewerte nach Entfernen von Probe 1, Probe 6 und Probe 8 (Auszug aus dem Programm Statistica®)**

In Abbildung 54 ist der Einfluss der Eingangsparameter Zwischenlagentemperatur und Tandemgeschwindigkeit auf die Zugfestigkeit dargestellt. Die quadratischen Effekte (Krümmung im Einfluss) sind deutlich zu sehen. Anhand dieser Grafik lässt sich ein Parameterfenster ausmachen, in dem sich die gewünschte Zugfestigkeit einstellen sollte.

**Tabelle 13 - Effektschätzung des Einflusses der Eingangsparameter auf das Ergebnis Zugfestigkeit nach Entfernen von Probe 1, Probe 6 und Probe 8 (Auszug aus dem Programm Statistica®)**

Effektschätzung; Var.: Rm DLU in N/mm <sup>2</sup> ; R <sup>2</sup> = ,99848; korr=,99088 (S960Qneu.sta) 2 Faktoren, 1 Blöcke, 7 Runs; MQ Residuen=2, AV Rm DLU in N/mm <sup>2</sup>										
Faktor	Effekt	Std.	t(1)	p	-95,% Konf.G r.	+95,% Konf.G r.	Koeff.	Std. Koeff.	-95,% Konf.G r.	+95,% Konf.G r.
MW/Konstante	1039,994	1,01	1032,01	0,0006	1027,19	1052,80	1039,99	1,01	1027,19	1052,80
(1) Zwischenlagentemperatur in °C(L)	-24,647	1,45	-17,01	0,0374	-43,06	-6,24	-12,32	0,72	-21,53	-3,12
Zwischenlagentemperatur in °C(Q)	-27,749	1,79	-15,51	0,0410	-50,48	-5,02	-13,87	0,89	-25,24	-2,51
(2) Tandemgeschwindigkeit in m/min(L)	23,353	1,48	15,74	0,0404	4,50	42,21	11,68	0,74	2,25	21,10
Tandemgeschwindigkeit in m/min(Q)	23,407	1,71	13,69	0,0464	1,69	45,13	11,70	0,85	0,84	22,56
1L * 2L	1,647	1,79	0,92	0,5269	-21,13	24,42	0,82	0,90	-10,56	12,21



**Abbildung 54 - Einflusses der Eingangsparameter auf das Ergebnis Zugfestigkeit nach Entfernen von Probe 1, Probe 6 und Probe 8 (Auszug aus dem Programm Statistica®)**

## 5.3 Hauptversuch

### 5.3.1 Durchführung des Hauptversuches

Nach erfolgter Auswertung der Vorversuche wurde der Hauptversuch geschweißt. Die stabilsten Ergebnisse wurden bei mittleren Temperaturen und Geschwindigkeiten erreicht. Somit wurde nach Betrachtung der statistischen Ergebnisse die Vorwärm- und Zwischenlagentemperatur auf 105°C und die Schweißgeschwindigkeit auf 0,9 m/min festgelegt. Zwischen dem Einbringen der einzelnen Schweißraupe wurde darauf geachtet, dass die Zwischenlagentemperatur von 105°C nicht unter- bzw. überschritten wurde. Der Schweißprozess wurde analog zu den Vorversuchen durchgeführt. Die verwendeten Schweißparameter sind in der folgenden Tabelle 14 festgehalten:

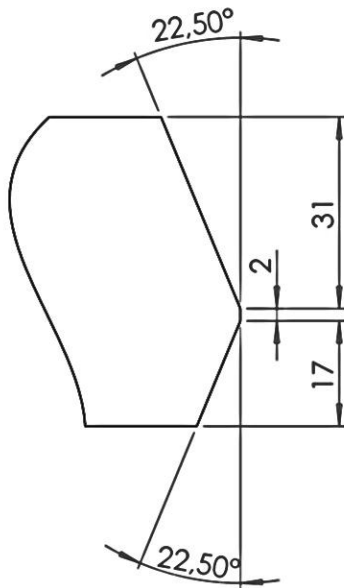
**Tabelle 14 - Übersicht Schweißparameter (Hauptversuch)**

<b>Schweißstrom:</b>	Kopf 1: 300 A / Kopf 2: 300 A
<b>Schweißspannung:</b>	Kopf 1: 30 V DC / Kopf 2: 30 V AC
<b>Zusatzwerkstoff:</b>	Kopf 1: UP-101 NiCrMo 2,5 (S3 NiCrMo 2,5), Ø 2,4 mm (Fließ) Kopf 2: UP-101 NiCrMo 2,5 (S3 NiCrMo 2,5), Ø 2,4 mm (Fließ)
<b>Schweißpulver:</b>	OP 121 TT/W (Oerlikon)
<b>Vorwärmtemperatur:</b>	105°C
<b>Zwischenlagentemperatur:</b>	105°C
<b>Schweißgeschwindigkeit:</b>	0,9 m/min

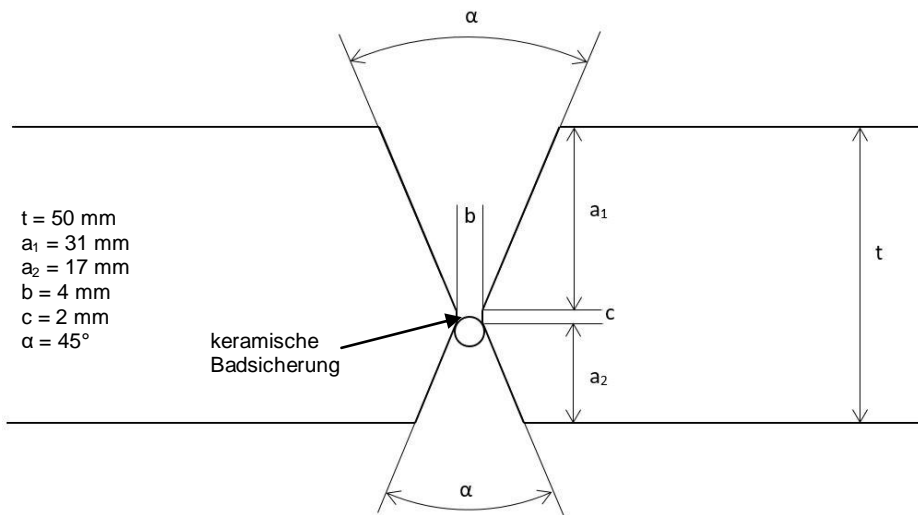
Da es bei den Vorversuchen im Wurzelbereich zu Unregelmäßigkeiten kam (siehe Abschnitt 5.2.2.1), wurde die Nahtvorbereitung beim Hauptversuch geändert. Der Steg wurde auf 2 mm verkürzt. Somit erhöhten sich die Maße der Flankentiefe um je 1 mm auf 31 mm und 17 mm (Abbildung 55). Um Unregelmäßigkeiten wie Bindefehlern oder ungenügender Durchschweißung vorzubeugen, wurde die Wurzellage mittels Metallschutzgas-schweißen eingebracht. Dazu war es notwendig, den Spalt b von 0...1 mm auf 4 mm zu erhöhen (Abbildung 56). Um ein Durchfallen des Schmelzbades zu verhindern, wurde eine keramische Schweißbadsicherung unter den Spalt b gelegt (Abbildung 57). Die Befestigung der Badsicherung erfolgte durch selbstklebende Aluminiumfolie. Das Schweißen der Wurzellage auf einer keramischen Badsicherung kann, bei entsprechender Fertigkeit des Schweißers, eine hohe Schweißnahtqualität zur Folge haben, so dass die Wurzel Bestandteil der Naht bleiben kann. Somit entfällt das Ausschleifen bzw. Ausfräsen der Wurzellage, was wiederum Zeit- und Kostenersparnis bedeutet.

Die Entnahme der Proben und die Auswertung des Hauptversuches erfolgte nach den Vorgaben für eine Verfahrensprüfung gemäß DIN EN ISO 15614-1. Die geschweißte Probe wurde nach Einhaltung der Wartezeit einer Reihe zerstörungsfreier und zerstörender Prüfungen unterzogen. Der Umfang der durchzuführenden Prüfungen ist in der DIN EN ISO 15614-1 festgelegt [22]. Zu den zerstörungsfreien Prüfungen zählen in diesem Fall eine Sichtprüfung nach DIN EN ISO 17637, eine Magnetpulverprüfung nach DIN EN ISO

17638 und eine Ultraschallprüfung nach DIN EN ISO 17640 [29] [23] [30]. Die mechanischen Eigenschaften der Schweißverbindung werden mittels Querkugversuch nach DIN EN ISO 4136, Kerbschlagbiegeversuch nach DIN EN ISO 9016, Biegeversuch nach DIN EN ISO 5173, einer makroskopischen und mikroskopischen Untersuchung nach DIN EN ISO 17639 und einer Härteprüfung nach DIN EN ISO 9015-1 untersucht.



**Abbildung 55 - Abmessungen der geänderten Nahtvorbereitung für den Hauptversuch**



**Abbildung 56 - Nahtgeometrie (schematisch)**



**Abbildung 57 - Vorbereitete Schweißprobe mit keramischer Badsicherung (Pfeil)**



### 5.3.2 Auswertung des Hauptversuches

Der Ablauf der einzelnen Prüfungen wurde bereits unter Abschnitt 5.2.2 ausführlich beschrieben. Bei den zerstörungsfreien Prüfungen wurden keine unzulässigen Unregelmäßigkeiten festgestellt. Die Dokumentation der Sicht-, Magnetpulver- und Ultraschallprüfung erfolgte in Prüfberichten, die in der Anlage Teil 3 einzusehen sind.

#### 5.3.2.1 Kerbschlagbiegeversuch

Die Kerbschlagbiegeversuche wurden analog zum Praktikum durchgeführt. Die Kühlung der Proben erfolgte in einem Tiefkälte-Umwälzthermostat. Die Prüftemperatur wurde auf  $-40^{\circ}\text{C}$  festgelegt. Das Kerbschlagpendel hatte einen Arbeitsinhalt von 450 Joule. Die Kerbschlagbiegeproben wurden gemäß DIN EN ISO 148-1 gefertigt [24]. Tabelle 15 zeigt die Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche:

**Tabelle 15 - Ergebnisse Kerbschlagarbeit (Hauptversuch)**

Proben-Nr.	Kerblage	Prüftemperatur	Kerbschlagarbeit KV <sub>2</sub> 450 in J				Bewertung
			1	2	3	Mittelwert ≥ 27 J	
			kleinster zulässiger Einzelwert 19 J				
Decklage							
0866/16-K1	VWT0/1	-40°C	72	69	65	69	e
0866/16-K2	VHT0/1	-40°C	64	68	71	68	e
0866/16-K3	VHT2/1	-40°C	143	144	115	134	e
0866/16-K4	VHT5/1	-40°C	65	42	59	55	e
Blechmitte							
0866/16-K5	VWT0/20	-40°C	68	70	68	69	e
0866/16-K6	VHT0/20	-40°C	67	85	71	74	e
0866/16-K7	VHT2/20	-40°C	82	66	75	74	e
0866/16-K8	VHT5/20	-40°C	31	23	19	24	ne

VWT Probe mit V-Kerb, Schweißgut, Kerblage senkrecht

VHT Probe mit V-Kerb, Wärmeeinflusszone, Kerblage senkrecht

e - erfüllt / ne - nicht erfüllt

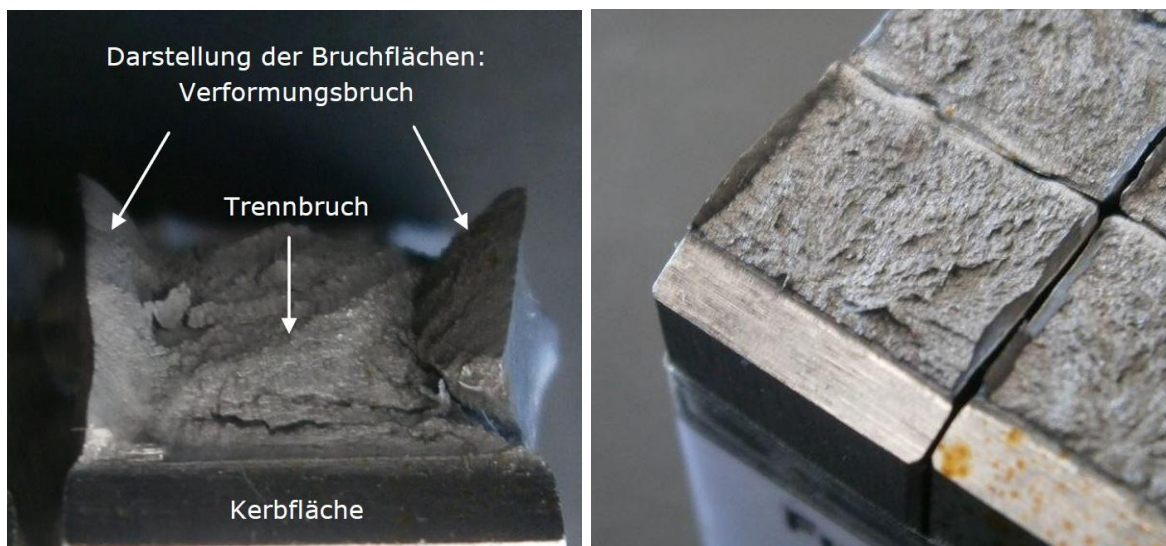
Es ist zu erkennen, dass die Probe 0866/16-K8 die Anforderungen an den Mittelwert von 27 Joule nicht erfüllt. Bei der Betrachtung der Bruchflächen der Proben K3 (Abbildung 58 links) und K8 (Abbildung 58 rechts) wird der Unterschied zwischen einem duktilen Bruch (Abbildung 59 links) und einem Spröbruch (Abbildung 59 rechts) deutlich. Der Rand der Bruchfläche der Probe K3 ist durch einen Bereich der plastischen Verformung gekennzeichnet. Die Art des Bruches im mittleren Bereich wird als Trennbruch bezeichnet. Hier fand infolge der schlagartigen Beanspruchung keine plastische Verformung mehr statt und es kam zum verformungsfreien Restbruch. Anders als die Decklage bei Probe K3 verhielt sich die Blechmitte bei Probe K8. Wurden mit der Probe K3 in der Kerblage SL+2

mm der Decklage Höchstwerte erreicht, konnten in der Blechmitte bei Kerblage SL+5 mm nur noch Minimalwerte verzeichnet werden. Es wird zwar die Mindestvorgabe für die Einzelwerte erfüllt, jedoch reichen diese drei Arbeitswerte nicht aus, um der Anforderung an den Mittelwert zu genügen. Im Bereich der Blechmitte sind es vor allem die Seigerungs-zonen, die einen Zähigkeitsabfall bewirken (siehe Abschnitt 4.3).

Im Vergleich zur Bruchfläche der Probe K3 weist die der Probe K8 kaum plastische Verformung auf. Es überwiegt deutlich der Spröbruchanteil, was sich auch in den Ergebnissen des Kerbschlagbiegeversuches widerspiegelt. Hier muss in späteren Versuchen durch geänderte Wärmeführung in der Blechmitte gezielt Einfluss auf die Eigenschaften des angrenzenden Grundwerkstoffes genommen werden.



**Abbildung 58 - Probe 0866/16-K3 (links) / Probe 0866/16-K8 (rechts)**



**Abbildung 59 - Duktile Bruchfläche (links) / Spröde Bruchfläche (rechts)**

### 5.3.2.2 Zugversuch

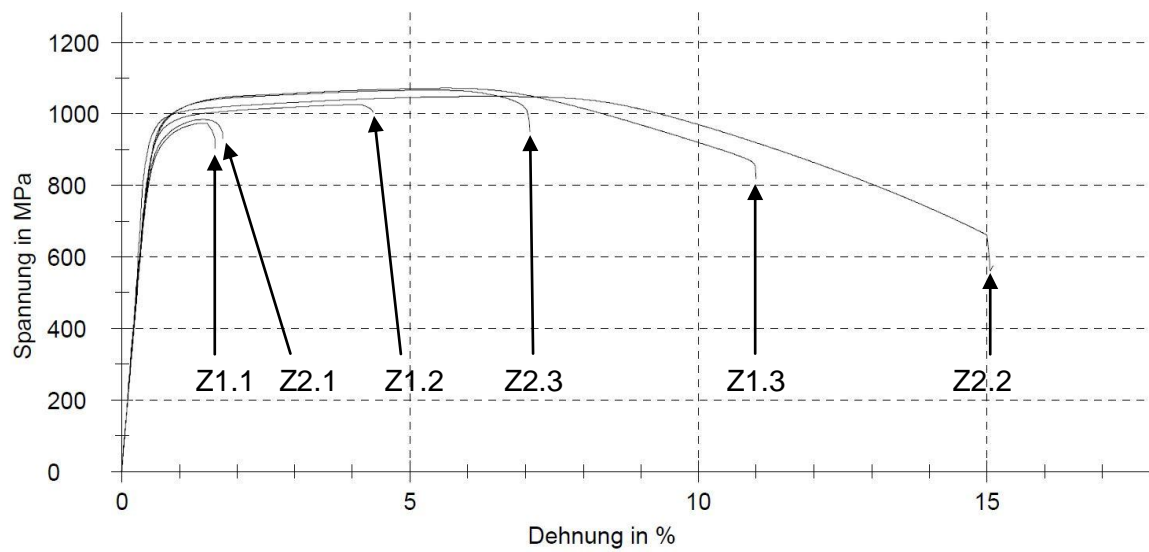
Der Zugversuch wurde nach DIN EN ISO 4136 durchgeführt und ist dadurch charakterisiert, dass eine genormte Probe unter Zugbeanspruchung bis zum Bruch gleichmäßig gedehnt wird [31]. Tabelle 16 zeigt die Ergebnisse der einzelnen Zugversuche, wobei die Proben Z1.1 und Z2.1 aus dem Bereich der oberen Decklage, die Proben Z1.2 und Z2.2 aus dem Bereich der Blechmitte und die Proben Z1.3 und Z2.3 aus dem Bereich der unteren Decklage entnommen wurden (vergleiche Abbildung 30, Abschnitt 5.1.4).

**Tabelle 16 - Ergebnisse Zugfestigkeit (Hauptversuch)**

Probe-Nr.	Abmessungen mm x mm	Maximal- kraft $F_{\max}$ in kN	0,2%Dehn- grenze $R_{p0,2}$ in $N/mm^2$ * $\geq 960 N/mm^2$	Zugfestigkeit $R_m$ in $N/mm^2$ 980-1150 $N/mm^2$	Bruchlage	Bewertung
0866/16-Z1.1	19,8 x 20,0	385,82	911	974	SG	ne
0866/16-Z2.1	19,8 x 20,0	389,85	926	984	SG	e
0866/16-Z1.2	19,7 x 20,0	404,17	952	1026	SG	e
0866/16-Z2.2	19,8 x 20,0	415,41	980	1049	GW	e
0866/16-Z1.3	19,7 x 20,0	422,34	966	1072	SG	e
0866/16-Z2.3	19,7 x 20,0	420,33	969	1067	SG	e

\* nur informativ, dient nicht der Bewertung    SG - Schweißgut / GW - Grundwerkstoff    e - erfüllt / ne - nicht erfüllt

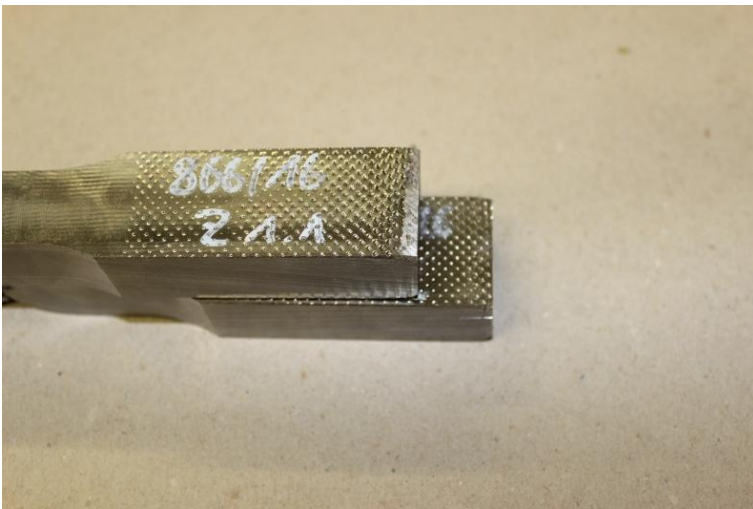
Aus Tabelle 16 geht hervor, dass die Probe 0866/16-Z1 die Mindestanforderung der Werkstoffnorm nicht erfüllt. Des Weiteren fällt auf, dass beide Proben aus der oberen Decklage geringere Werte als die übrigen Proben aufweisen. Diagramm 7 zeigt das Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Zugversuche des Hauptversuches. Es wird deutlich, dass die Dehnung beider Proben Z1.1 und Z2.1 gegenüber der der restlichen Proben geringer ist.

**Diagramm 7 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm (Hauptversuch)**

Die aus Diagramm 7 erkennbare unterschiedliche Dehnung wird auch in Abbildung 60 deutlich:



**Abbildung 60 - Übersicht: Vergleich Probe Z1.1 (oben) und Probe 2.2 (unten)**



**Abbildung 61 - Längenunterschied von 16,5 mm nach Zugversuch  
(oben: Probe Z1.1 / unten: Probe Z2.2)**

### 5.3.2.3 Biegeversuch

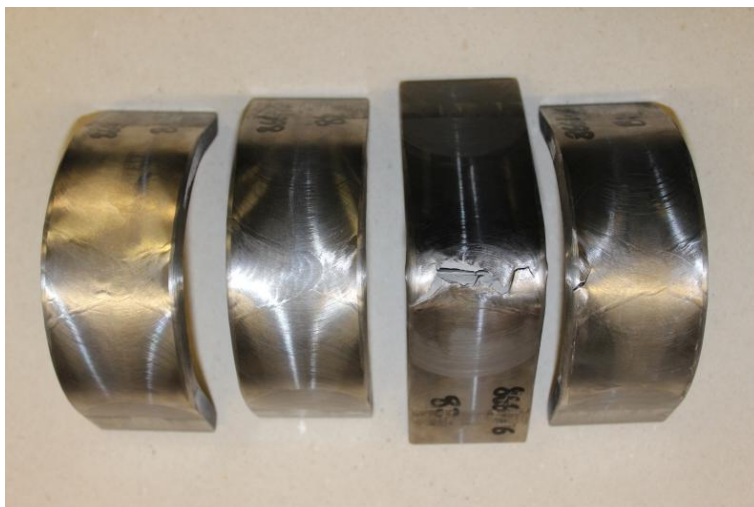
Der Biegeversuch wurde nach DIN EN ISO 5173 in einer Biegevorrichtung mit zwei Auflagerrollen, einem Biegestempel und einer mittig eingelegten Biegeprobe durchgeführt. Der Biegestempel verformt das Probenstück plastisch, ohne dass die Biegerichtung umgekehrt wird [32]. Durchgeführt wurde dieser Versuch an vier Seitenbiegeproben, da die Dicke des Grundwerkstoffes mehr als 12 mm betrug. Ab dieser Blechdicke wird das Verwenden von Seitenbiegeproben empfohlen [22]. Diese Probenform gestattet eine Prüfung des gesamten Nahtquerschnittes in einem Prüfschritt. Die Abmessungen und die erreichten Ergebnisse sind in Tabelle 17 enthalten:

**Tabelle 17 - Ergebnisse Biegeversuch (Hauptversuch)**

Probe-Nr.	Abmessungen in mm x mm	Beanspruchung	Biegewinkel	Bewertung
0866/16-B1	10,0 x 50,4	SBB	180°	e
0866/16-B2	10,0 x 50,5	SBB	180°	e
0866/16-B3	10,0 x 50,4	SBB	180°	ne
0866/16-B4	10,0 x 50,3	SBB	180°	ne

SBB - Seitenbiegeprobe

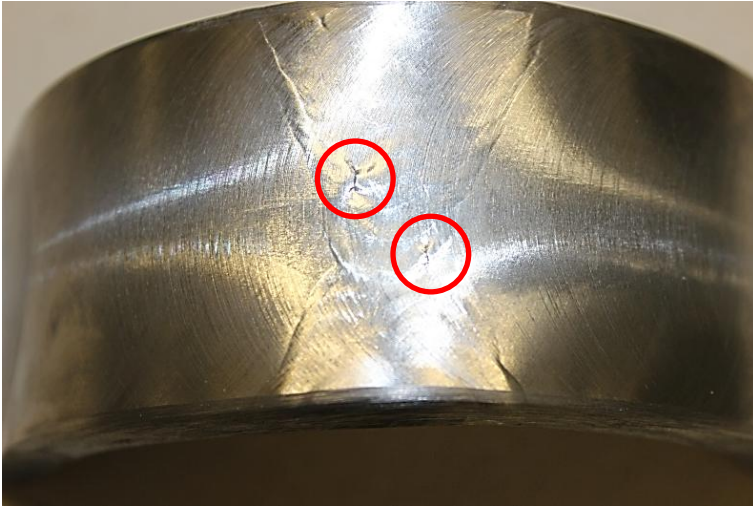
e - erfüllt / ne - nicht erfüllt



**Abbildung 62 - Seitenbiegeproben Hauptversuch (von links nach rechts: Probe B1, Probe B2, Probe B3, Probe B4)**

Abbildung 62 zeigt die Seitenbiegeproben B1 - B4 nach dem Versuch. Der Biegedorn-durchmesser wurde gemäß [22] berechnet und betrug 90 mm. Die Stützweite der Auflager wurde soweit gewählt, dass einem Verklemmen der Probe vorgebeugt wurde. Der Biegestempel mit dem Biegedorn verformte die Proben stoßfrei bis zu einem Biegewinkel von 180° (Forderung DIN EN ISO 15614-1 [22]). Probe B1 und Probe B2 erfüllten die Anforderungen der DIN EN ISO 15614-1. Nach dem Versuch konnten bei Probe B1 zwei kleine Anrisse festgestellt werden (Abbildung 63). Diese Anrisse betrugen in ihrer größten Ausdehnung weniger als 3 mm und waren somit als zulässig anzusehen. Probe B3 und Probe

B4 erfüllten die Normanforderungen nicht. Bereits nach einem Biegewinkel von  $85^\circ$  konnte bei Probe B3 ein Bruch festgestellt werden (Abbildung 64). Eine weitere unzulässige Unregelmäßigkeit ist bei Probe B4 auf Abbildung 65 zu erkennen. Der seitlich beginnende Anriss hat eine Länge von 12 mm und würde bei Fortschreiten zum Versagen der Probe führen. Das Protokoll des Biegeversuches ist in Anlage Teil 3 enthalten.



**Abbildung 63 - Seitenbiegeprobe B1: zulässige Unregelmäßigkeit (jeder Anriss < 3 mm)**



**Abbildung 64 - Seitenbiegeprobe B3: unzulässige Unregelmäßigkeit (Bruch bei Biegewinkel  $85^\circ$ )**





**Abbildung 65 - Seitenbiegeprobe B4: unzulässige Unregelmäßigkeit  
(seitlicher Anriss > 3 mm / Länge des Anrisses: 12 mm)**

Die Ursachen für das Nichtbestehen der Biegeprüfung können mikroskopisch kleine Ungängen in der Schweißnaht sein. Schlackeeinschlüsse und mittels Ultraschallprüfung nicht nachweisbare Unregelmäßigkeiten sind weitere Ursachen für das Versagen von Proben bei einer Biegebelastung.



### 5.3.2.4 Härteprüfung

Die Prüfkraft in der durchgeführten Härteprüfung (Verfahren nach Vickers) betrug 98 N. Der Ablauf wurde in Abschnitt 5.1.8 beschrieben. Nachfolgende Tabelle 18 enthält die ermittelten Werte. Abbildung 66 zeigt die Lage der Härteeindrücke im Makroschliff. Beim Platzieren der Eindrücke wurde darauf geachtet, dass der Abstand der einzelnen Messpunkte ausreichend dimensioniert war. Gemäß DIN EN ISO 9015-1 wird ein Abstand der Härteeindrücke zueinander von 1 mm empfohlen. Dadurch wird eine gegenseitige Beeinflussung der Messwerte durch gestauchte Gefügebestandteile ausgeschlossen [33].

**Tabelle 18 - Ergebnisse Härteprüfung (Hauptversuch)**

<b>Eindruck-Nr.</b>	<b>Lage des Härteeindrucks</b>	<b>Reihe 1 - Härte- werte HV10</b> <i>Abstand von der Ober- seite ca. 1 mm</i>	<b>Reihe 2 - Härte- werte HV10</b> <i>Wurzellage</i>	<b>Reihe 3 - Härte- werte HV10</b> <i>Abstand von der Unter- seite ca. 1 mm</i>
1	GW	348	344	345
2	GW	350	345	342
3	GW	349	342	347
4	WEZ	394	345	376
5	WEZ	388	346	391
6	WEZ	364	318	399
7	SG	363	367	322
8	SG	362	349	355
9	SG	322	318	319
10	WEZ	386	331	373
11	WEZ	406	355	387
12	WEZ	395	329	376
13	GW	346	339	342
14	GW	347	345	349
15	GW	348	333	345

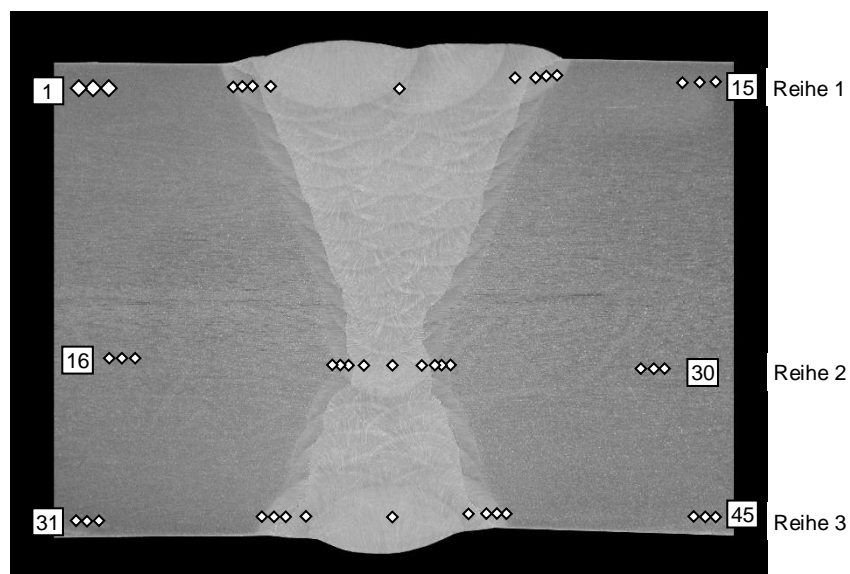
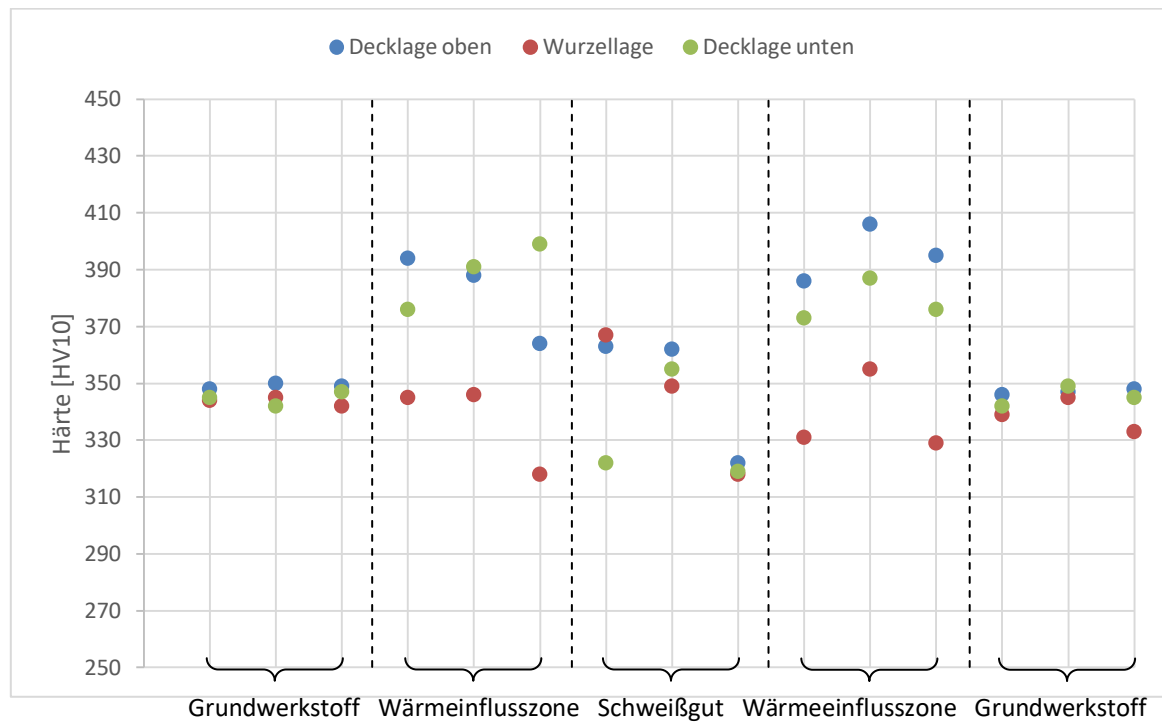
GW - Grundwerkstoff

WEZ - Wärmeeinflusszone

SG - Schweißgut

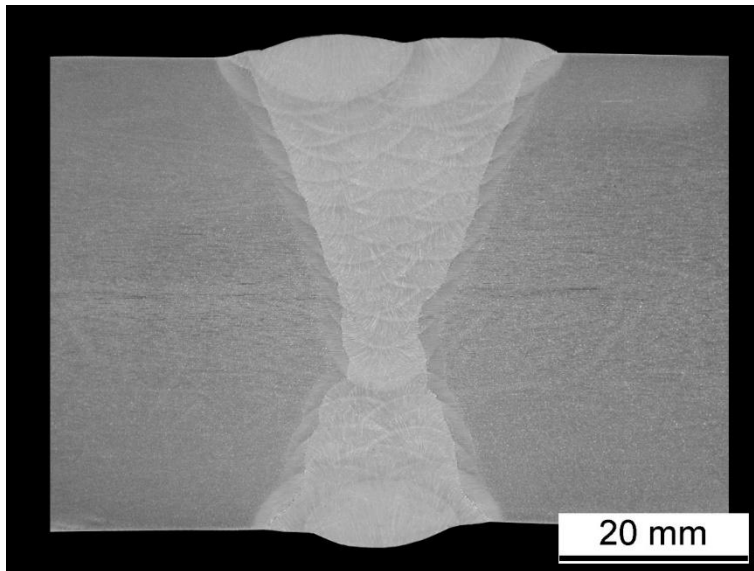
In den Vorversuchen wurde ein Maximalwert von 450 HV10 vereinbart [22]. Nachfolgendes Diagramm 8 gibt einen Überblick über die Verteilung der Härtewerte. Der auf der Ordinate eingetragene Höchstwert stellt gleichzeitig den Maximalwert von 450 HV10 dar.

Die Ergebnisse in Tabelle 18 zeigen, dass es während der Herstellung der Schweißprobe zu keiner übermäßigen Aufhärtung an der Schmelzlinie (Messpunkte 6 und 10) und auch nicht zu einem Einbruch der Härte in der restlichen Wärmeeinflusszone gekommen ist.

**Diagramm 8 - Verteilung der Härtewerte (Hauptversuch)****Abbildung 66 - Lage der Härteeindrücke im Makroschliff**

### 5.3.2.5 Makroskopische und mikroskopische Untersuchung

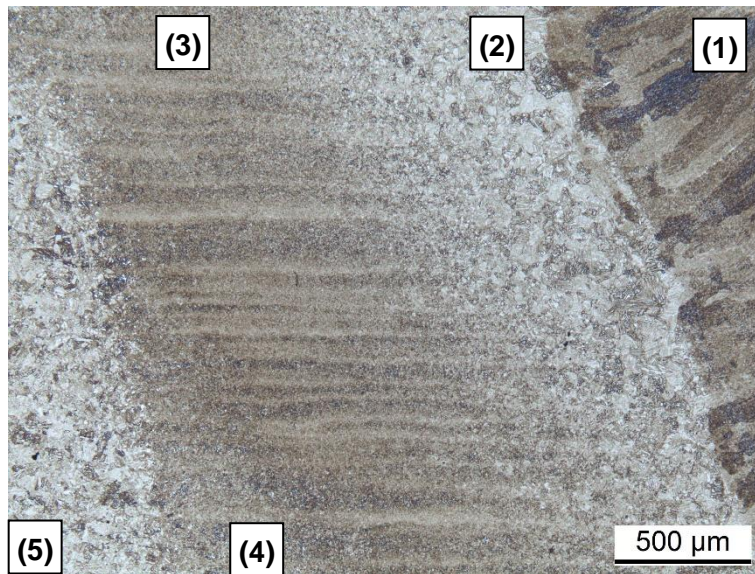
Die makroskopische und mikroskopische Untersuchung erfolgte nach den Vorgaben der DIN EN ISO 17639. Die Aufbereitung der Makro- und Mikroschliffe wurde in Abschnitt 5.2.2.2.4 beschrieben. Abbildung 67 zeigt den Makroschliff der Schweißverbindung.



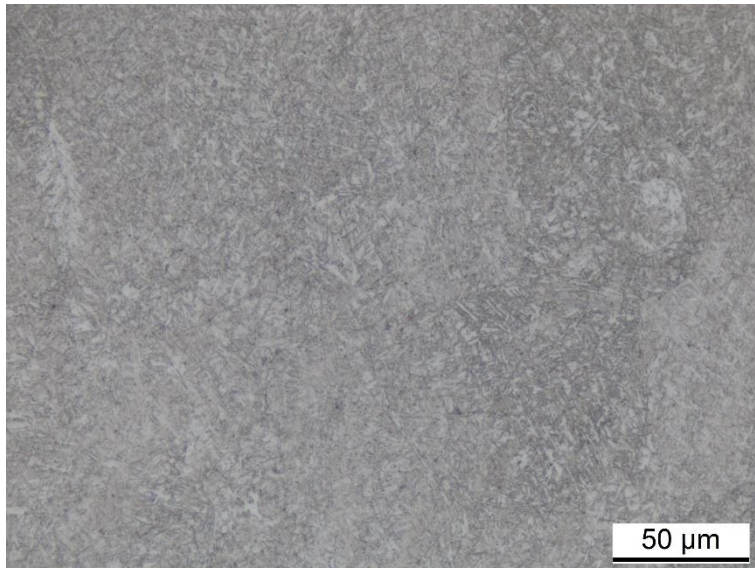
**Abbildung 67 - Probe 0866/16 Makroschliff (Ätzung: nach Adler)**

Es konnten keine Unregelmäßigkeiten in der Schweißverbindung festgestellt werden. Deutlich sind in der Blechmitte Seigerungen zu erkennen. Diese Bereiche sind oft die Schwachstelle in Bezug auf die Tieftemperaturzähigkeit (Kerbschlagarbeit, siehe Abschnitt 5.3.2.1).

Die mikroskopische Untersuchung wurde analog zu den Vorversuchen an einem Auflichtmikroskop Leica DM6000M durchgeführt (Abbildung 44, Abschnitt 5.2.2.2.4). Begutachtet wurde der Mikroschliff im ungeätzten und im geätzten Zustand. Der ungeätzte Schliff wurde auf Unregelmäßigkeiten, wie Mikrorisse, Mikroporen, Mikrolunker und nichtmetallische Einschlüsse untersucht. Am geätzten Schliff wurden die Kornstruktur des Schweißgutes, der Wärmeeinflusszone und des unbeeinflussten Grundwerkstoffes genauer betrachtet. Die Ergebnisse zeigen die folgenden Abbildung 68 bis Abbildung 73.



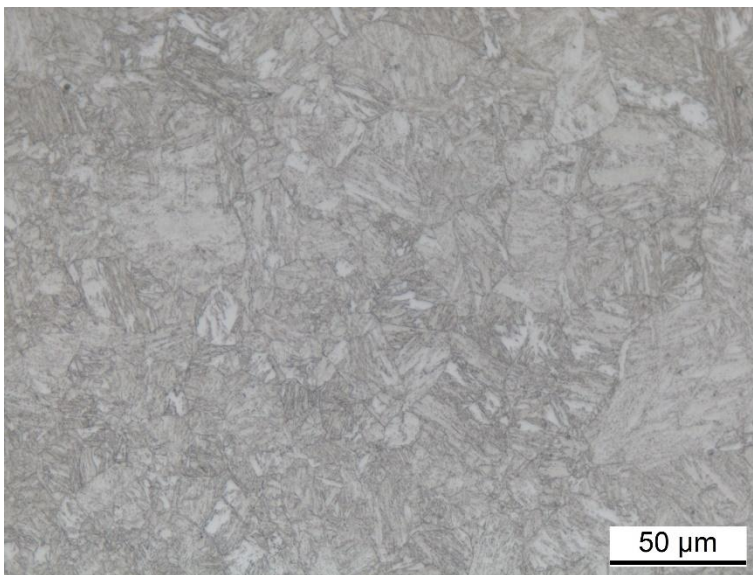
**Abbildung 68 - Mikroschliff Hauptversuch: Übersicht Schweißverbindung 50-fach (Ätzung: Nital)**



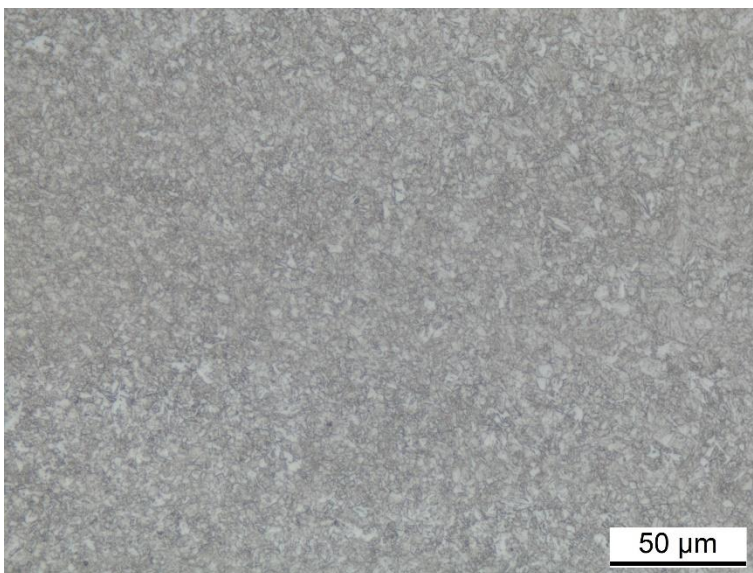
**Abbildung 69 - Mikroschliff Hauptversuch: Schweißgut 500-fach (Ätzung: Nital)**

Abbildung 68 zeigt einen Überblick über die Schweißverbindung. Am rechten Rand ist das dunkel eingefärbte Schweißgut (1) (siehe auch Abbildung 69) zu erkennen. Der grobkörnige Bereich der Wärmeeinflusszone (2) ist etwas heller eingefärbt. In diesem auch als Grobkornzone (Abbildung 70) bezeichneten Gebiet findet eine Überhitzung des Werkstoffes statt. Nach der vollständigen Austenitisierung bildet sich ein grobes Korn. Zu vergleichen ist dieser Vorgang mit dem Grobkornglühen, eine Wärmebehandlung, die zur Verbesserung der Spanabnahme führt. In Bezug auf Kerbschlagzähigkeiten sind in diesem Bereich die geringsten Werte zu erwarten (ohne Berücksichtigung von Seigerungszone(n)). Links an die Grobkornzone schließt sich wieder etwas dunkler eingefärbt die Feinkornzone (3) (Abbildung 71) an. Die Ausprägung des Gefüges in dieser Zone entsteht durch Wärmeeinwirkung, vergleichbar den Vorgängen beim Normalglühen. Die Temperaturen

liegen in diesem Bereich knapp über dem oberen Umwandlungspunkt  $A_{C3}$ . Zwischen der Feinkornzone und dem Grundwerkstoff (5) befindet sich ein Bereich, der als Zone der teilweisen Gefügeumwandlung (4) (Abbildung 72) bezeichnet wird. Dieses Gebiet stellt die Grenze der Wärmeeinflusszone zum Grundwerkstoff (Abbildung 73) dar. Charakterisiert ist die Zone durch unvollständige Umkristallisation. Das Gefüge, welches aus Ferrit und Perlit besteht, wird während der Erwärmung zwischen  $A_{C3}$  und  $A_{C1}$  nur teilweise in Austenit umgewandelt. Eine signifikante Änderung des Gefüges findet in diesem Bereich nicht mehr statt [7]. Zu erkennen ist, ähnlich wie bei Abbildung 24 die Ausbildung der Troostitrosetten, die sich vorzugsweise entlang der Korngrenzen bilden.

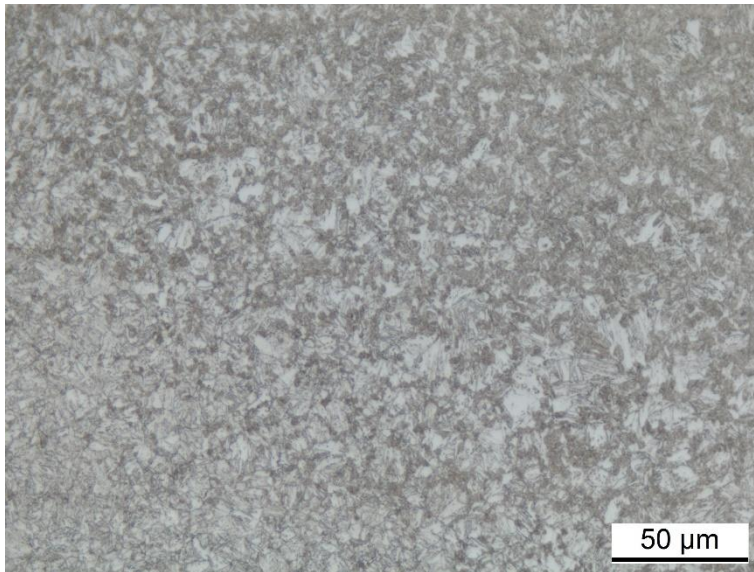


**Abbildung 70 - Mikroschliff Hauptversuch: Grobkornzone 500-fach (Ätzung: Nital)**

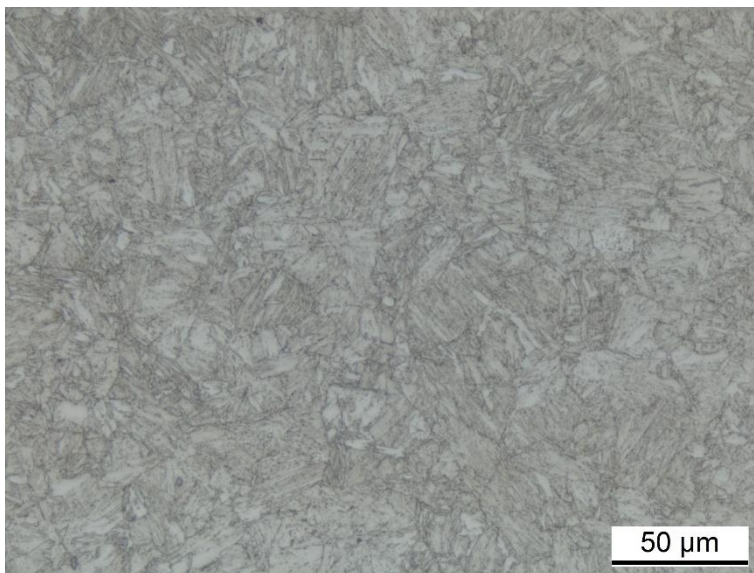


**Abbildung 71 - Mikroschliff Hauptversuch: Feinkornzone 500-fach (Ätzung: Nital)**





**Abbildung 72 - Mikroschliff Hauptversuch: Zone der teilweisen Gefügeumwandlung 500-fach (Ätzung: Nital)**



**Abbildung 73 - Mikroschliff Hauptversuch: Grundwerkstoff 500-fach (Ätzung: Nital)**

Bei der Untersuchung der Mikroschliffe konnten keine unzulässigen Unregelmäßigkeiten festgestellt werden. Die Ausprägung der Gefügebestandteile wies keine Besonderheiten auf, die Rückschlüsse auf einen ungeeigneten Schweißprozess gaben. Natürlich ist ein fehlerfreier Mikroschliff kein Garant für eine komplett fehlerfreie Schweißnaht. Zulässige und unzulässige Unregelmäßigkeiten können an jeder beliebigen Stelle im Lagenaufbau auftreten.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

### 6.1 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war, bereits gewonnene Erkenntnisse über das Unterpulverschweißen von hochfesten Stählen zu vertiefen und zu erweitern. Dazu wurden insgesamt 10 Probenbleche nach einem zentralen zusammengesetzten Versuchsplan geschweißt und ihre mechanischen Eigenschaften nach normativen Vorgaben getestet. Die daraus erlangten Ergebnisse wurden verwendet, um eine Probe nach den Maßgaben einer Verfahrensprüfung nach DIN EN ISO 15614-1 zu schweißen und zu prüfen. Auch wenn die erreichten Resultate zum Teil unterhalb der Normforderung lagen, wurden dennoch zufriedenstellende Untersuchungsergebnisse erzielt. Die ermittelten Zugfestigkeiten in den durchgeführten Versuchen zeigen auf, dass es möglich ist, einen Stahl der Güte S960QL mittels UP-Schweißen so zu fügen, dass geforderte Mindestfestigkeiten mit einem Zusatzwerkstoff, der laut Hersteller für einen Stahl der Güte S690QL konzipiert ist, erreicht werden können. Mit den Ergebnissen der Härteprüfung konnte gezeigt werden, dass es im Bereich der Schweißnaht und dem angrenzenden Grundwerkstoff zu keinen Aufhärtungen oder Härteeinbrüchen kommt. Im Kerbschlagbiegeversuch wurde an verschiedenen Proben nachgewiesen, dass die Mindestanforderung (27 Joule) von Kerbschlagproben aus dem Schweißgut, aus dem direkten Bereich der Schmelzlinie und deren Nahbereich erfüllt werden kann. Die Werte der Tabelle 8 und Tabelle 15 belegen diese Aussage. In den Bereichen, in denen der Einfluss der Wärme nachweisbar war, lagen die Werte der Kerbschlagarbeit zum Teil deutlich über der Mindestanforderung. Ein mehrfach gestaffelter Prozess aus Wärmeeintrag und Wiederabkühlung durch das Mehrlagen-UP-Schweißen beeinflusst demzufolge positiv die Tieftemperatureigenschaften des getesteten Grundmaterials in der WEZ. Ursächlich ist die stetig abwechselnde Folge aus Aufhärtungs- und Wiederanlassvorgängen, die in lokal begrenzter Form dem Herstellungsprozess dieser Stähle ähnlich sind.

### 6.2 Ausblick

Die Ergebnisse der zurückliegenden Versuchsreihe waren so positiv, dass von Seiten eines renommierten Herstellers von Schweißzusatzwerkstoffen vertiefende Untersuchungen mit veränderter Draht-Pulver-Kombination vereinbart wurden. Zusätzlich ist eine angepasste Wärmestrategie im Bereich der Seigerungszonen erforderlich. Bei weiteren Versuchen wird auf die Vorwärmung mit  $C_3H_8$  verzichtet und das Verfahren des induktiven

Vorwärmens angewendet. Des Weiteren sieht die Planung vor, die Proben bei einer Temperatur von 200°C ... 300°C über mehrere Stunden wasserstoffarm zu glühen.



## Literatur

- [1] DIN EN ISO 10025-6, *Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen – Teil 6: Technische Lieferbedingungen für Flacherzeugnisse aus Stählen mit höherer Streckgrenze im vergüteten Zustand*, 2009.
- [2] Oerlikon Schweißtechnik GmbH, *Kompetenz Journal No. 4*, 2009.
- [3] M. Beckert, „Aus der Geschichte des Schweißens: Von der Erfindung des Unterpulverschweißens,“ *Schweißen & Schneiden*, pp. 156-157, 04 2011.
- [4] Oerlikon Schweißtechnik GmbH, *Cranes & Heavy Lifting Equipment*. O. S. GmbH, Hrsg.
- [5] U. Dilthey und J. de Payrebrune, „Unterpulverschweißen der hochfesten Feinkornbaustähle,“ *Schweißen & Schneiden*, Nr. 9, pp. 544-548, 9 2000.
- [6] U. Dilthey, *Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1 – Schweiß- und Schneidtechnologien*, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2006.
- [7] H. J. Fahrenwaldt und V. Schuler, *Praxiswissen Schweißtechnik*, Vieweg+Teubner, 2011.
- [8] ESAB Welding & Cutting GmbH, *Produktkatalog 1*, 2010.
- [9] Oerlikon Schweißtechnik GmbH, *Handbuch Schweißzusatzwerkstoffe*, 2016.
- [10] ESAB Welding & Cutting GmbH, *OK Handbuch - Schweißzusätze*, 2009.
- [11] A. H. Schulze und G. Schulze, *Fertigungstechnik*, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2010.

- [12] W. Göttert, E. Schofer, D. Dirksen, F. Tessin, M. Gehring, G. Peters und N. Klingusch, Unterpulverschweißen – Verfahren, Schweißeinrichtungen, Anlagentechnik, Solingen: ESAB GmbH, 1995.
- [13] J. de Payrebrune, Vermeidung von Kaltrissen beim Unterpulverschweißen von hochfesten Feinkronbaustählen der Qualität S890QL und S960QL, R. T. H. Aachen, Hrsg., Shaker Aachen, 2000.
- [14] Lincoln Electric, *Submerged Arc Equipment Systems*.
- [15] DIN 1910-11, *Schweißen - Werkstoffbedingte Begriffe für Metallschweißen*, 1979.
- [16] G. Hochreiter, Unterpulverschweißen in der Praxis, Renningen-Malmsheim: expert-Verlag, 1995.
- [17] DIN EN ISO 14174, *Schweißzusätze – Pulver zum Unterpulverschweißen und Elektroschlackeschweißen – Einteilung*, 2012.
- [18] „Bimssteingranulat für das Unterpulverschweißen,“ *Schweißen & Schneiden*, 4 2011.
- [19] Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V., *DVS-Merkblatt 0914 - Verarbeitung und Lagerung von Schweißpulvern für das Unterpulverschweißen*, 2006.
- [20] SEW 088 4. Ausgabe, *Schweißgeeignete Feinkornbaustähle*, 1993.
- [21] DIN EN ISO 9692-2, *Schweißnahtvorbereitung - Teil 2 Unterpulverschweißen von Stahl*, 1999.
- [22] DIN EN ISO 15614-1, *Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe – Schweißverfahrensprüfung – Teil 1: Lichtbogen- und Gasschweißen von Stählen und Lichtbogenschweißen von Nickel und Nickellegierungen*, 2012.

- [23] DIN EN ISO 17638, *Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen*, 2010.
- [24] DIN EN ISO 148-1, *Metallische Werkstoffe – Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy – Teil 1: Prüfverfahren*, 2011.
- [25] DIN EN ISO 17639, *Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen — Makroskopische und mikroskopische Untersuchungen von Schweißnähten*, 2013.
- [26] DIN EN ISO 5817, *Schweißen – Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen) – Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten*, 2014.
- [27] J. Tietböhl, *Praktikumsbericht "Untersuchungen zur Tieftemperaturzähigkeit beim Unterpulverschweißen von hochfesten vergüteten Stählen"*, Mittweida, 2016.
- [28] DNV-GL, *Rules for classification (Part 2 Materials and welding - Chapter 4 Fabrication and testing)*, 2016.
- [29] DIN EN ISO 17637, *Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen - Sichtprüfung von Schmelzschweißverbindungen*, 2011.
- [30] DIN EN ISO 17640, *Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen - Ultraschallprüfung - Techniken, Prüfklassen und Bewertung*, 2011.
- [31] DIN EN ISO 4136, *Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen – Querzugversuch*, 2013.
- [32] DIN EN ISO 5173, *Zerstörende Prüfungen von Schweißnähten an metallischen Werkstoffen – Biegeprüfungen*, 2012.
- [33] DIN EN ISO 9015-1, *Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen – Härteprüfung – Teil 1: Härteprüfung für Lichtbogenschweißverbindungen*, 2011.

- [34] A. Scharff, *Erzielbarer und erzielter Nutzen durch den Einsatz schweißtechnischer Software am Beispiel von Weldware (unveröffentlichter Artikel)*, 2012.
- [35] Germanischer Lloyd, *Vorschriften & Richtlinien (für schiffbauliche Konstruktionen)*, 2008.
- [36] DIN EN ISO 10025-1, *Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen - Teil 1: Allgemeine technische Lieferbedingungen*, 2005.
- [37] DIN EN ISO 9016, *Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen – Kerbschlagbiegeversuch – Probenlage, Kerbrichtung und Beurteilung*, 2013.
- [38] Hermann Fliess & Co. GmbH, „UP-Drahtelektroden für niedrig- und mittellegierte Stähle - Hermann Fliess & Co. GmbH,“ Fliess, [Online]. Available: [http://www.fliess.biz/de/produktprogramm/up-drahtelektroden/up-drahtelektroden-für-niedrig-und-mittellegierte-stähle/up-101-nicrmo-2,5-\(s3-nicrmo-2,5\)](http://www.fliess.biz/de/produktprogramm/up-drahtelektroden/up-drahtelektroden-für-niedrig-und-mittellegierte-stähle/up-101-nicrmo-2,5-(s3-nicrmo-2,5)). [Zugriff am 29 06 2016].
- [39] C. Weiß, *Datenanalyse und Modellierung mit STATISTICA*, München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag München, 2007.
- [40] E. Weck und E. Leistner, *Metallographische Anleitung zum Farbätzen nach dem Tauchverfahren / Band II: Farbätzmittel nach Behara und ihre Abwandlungen*, Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik (DVS) GmbH, 1983.
- [41] Onlinequelle,  
„<http://www.kjellberg.de/Schweisstechnik/Service/Schweisverfahren/UP-Schweissen.html>,“ [Online]. Available:  
<http://www.kjellberg.de/Schweisstechnik/Service/Schweisverfahren/UP-Schweissen.html>. [Zugriff am 13 04 2016].

## Anlagen

<b>Anlagen, Teil 1.....</b>	<b>107</b>
<b>Anlagen, Teil 2.....</b>	<b>118</b>
<b>Anlagen, Teil 3.....</b>	<b>228</b>

## Anlagen, Teil 1

Dieses Kapitel enthält die Zeugnisse und Datenblätter der im Versuch eingesetzten Materialien. Im Einzelnen betrifft dies folgende Dokumente:

- 3.1-Zeugnis des Versuchswerkstoffes S960QL
- 3.1-Zeugnis Schweißzusatzwerkstoff UP101-NiCrMo2,5
- Datenblatt Schweißpulver OP121TT

## 3.1-Zeugnis des Versuchswerkstoffes S960QL (Schmelze 682458)

ThyssenKrupp Steel Europe



ThyssenKrupp

Werkst.-Nr. Werkst.-No. No. de l'usine	A08 4042011	Zugheft-Nr. Certificate-No. No de certificat	A03 1715917001	Sendungs-Nr. Shipment-No. No d'envoi	45468446	Seite-Nr. Page-No. Page-No.	1																																																																																										
ThyssenKrupp Steel Europe AG-47161Duisburg A01				BESCHREIBUNG ÜBER MATERIALPRÜFUNGEN DOCUMENT ON MATERIAL TESTS DOCUMENT DE CONTROL DES MATÉRIAUX		EN 10204 EN 10204																																																																																											
A06 THYSSENKRUPP SCHULTE GMBH  POSTFACH 105036 D 40041 DÜSSELDORF				A02 ABNAHMEPRÜFZEUGNIS 3.1 INSPECTION CERTIFICATE 3.1																																																																																													
Bestell-Nr. Order-No. No de commande	SKO-5403550817			02.11.2015 0203 52 75220 0203 52 75213 abnahme_zeugnisse.grobblech@thyssenkrupp.com	7n	A05																																																																																											
A07.1-A07.5																																																																																																	
Werkstoff, Quality, Matériau / Lieferbedingungen, Specification, Conditions de livraison B02/B03 XABO980 TKS-WBL 245 10.13 TOL EN10029 KLB/N OB EN 10163 KLB/3																																																																																																	
Kennzeichnung Marking Marque	WERKSTOFF; SCHMELZ-NR.; FERTIGUNGS-/PROBE-NR. MATERIAL, HEAT-NO., MANUFACTURING/SAMPLE-NO.				Zeichen des Lieferanten Supplier's mark Marque d'usine																																																																																												
B06				A04																																																																																													
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>B01 ERZEUGNISFORM TYPE OF PRODUCT</p> <p>GROBBLECH, BESÄUMTE KANTEN HEAVY PLATES, TRIMMED EDGES</p> <p>LISTE DER MATERIALIDENTEN LIST OF MATERIAL IDENTIS</p> </div> <div> <p>Werkstoff-Identifizierung Material Identification Identification du Matériau</p> </div> </div> <table border="1"> <thead> <tr> <th>POS.</th> <th>B07 PAKET ITEM</th> <th>B07 BLECH-NR. PLATE-NO.</th> <th>B07 SCHMELZ-NR. HEAT-NO.</th> <th>B08 STÜCK ZAHL NUMBER PIECES</th> <th>B13 GEWICHT GEWOG. WEIGHT</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>B09 x B10 x B11 8,0 x 2000,0 x 12000 [mm]</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Kg</td> </tr> <tr> <td>003</td> <td></td> <td>50766101 57445101</td> <td>651475 651667</td> <td>1 1</td> <td>1.542 1.542</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td>*</td> <td>2</td> <td>3.084</td> </tr> <tr> <td>014</td> <td>50,0 x 2000,0 x 12000 [mm]</td> <td>36963101</td> <td>682458</td> <td>1</td> <td>9.686</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td>*</td> <td>1</td> <td>9.686</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td>**</td> <td>3</td> <td>12.770</td> </tr> </tbody> </table> <p>TRANSPORT-NR. TRANSPORT-NO. OE-HE1010</p> <p>CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG DER SCHMELZE IN % CHEMICAL COMPOSITION OF THE LADLE SAMPLES % C71-C99</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>B07 SCHMELZ-NR.</th> <th>C</th> <th>SI</th> <th>MN</th> <th>P</th> <th>S</th> <th>AL-G</th> <th>B-G</th> <th>CR</th> <th>CU</th> <th>MO</th> <th>N</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>651475</td> <td>,160</td> <td>,260</td> <td>1,090</td> <td>,009</td> <td>,0010</td> <td>,087</td> <td>,0023</td> <td>,640</td> <td>,020</td> <td>,600</td> <td>,0042</td> </tr> <tr> <td>651667</td> <td>,161</td> <td>,250</td> <td>1,060</td> <td>,011</td> <td>,0015</td> <td>,080</td> <td>,0021</td> <td>,610</td> <td>,020</td> <td>,601</td> <td>,0030</td> </tr> <tr> <td>682458</td> <td>,160</td> <td>,240</td> <td>,940</td> <td>,011</td> <td>,0009</td> <td>,020</td> <td>,0002</td> <td>,660</td> <td>,020</td> <td>,500</td> <td>,0030</td> </tr> </tbody> </table>								POS.	B07 PAKET ITEM	B07 BLECH-NR. PLATE-NO.	B07 SCHMELZ-NR. HEAT-NO.	B08 STÜCK ZAHL NUMBER PIECES	B13 GEWICHT GEWOG. WEIGHT		B09 x B10 x B11 8,0 x 2000,0 x 12000 [mm]				Kg	003		50766101 57445101	651475 651667	1 1	1.542 1.542				*	2	3.084	014	50,0 x 2000,0 x 12000 [mm]	36963101	682458	1	9.686				*	1	9.686				**	3	12.770	B07 SCHMELZ-NR.	C	SI	MN	P	S	AL-G	B-G	CR	CU	MO	N	651475	,160	,260	1,090	,009	,0010	,087	,0023	,640	,020	,600	,0042	651667	,161	,250	1,060	,011	,0015	,080	,0021	,610	,020	,601	,0030	682458	,160	,240	,940	,011	,0009	,020	,0002	,660	,020	,500	,0030
POS.	B07 PAKET ITEM	B07 BLECH-NR. PLATE-NO.	B07 SCHMELZ-NR. HEAT-NO.	B08 STÜCK ZAHL NUMBER PIECES	B13 GEWICHT GEWOG. WEIGHT																																																																																												
	B09 x B10 x B11 8,0 x 2000,0 x 12000 [mm]				Kg																																																																																												
003		50766101 57445101	651475 651667	1 1	1.542 1.542																																																																																												
			*	2	3.084																																																																																												
014	50,0 x 2000,0 x 12000 [mm]	36963101	682458	1	9.686																																																																																												
			*	1	9.686																																																																																												
			**	3	12.770																																																																																												
B07 SCHMELZ-NR.	C	SI	MN	P	S	AL-G	B-G	CR	CU	MO	N																																																																																						
651475	,160	,260	1,090	,009	,0010	,087	,0023	,640	,020	,600	,0042																																																																																						
651667	,161	,250	1,060	,011	,0015	,080	,0021	,610	,020	,601	,0030																																																																																						
682458	,160	,240	,940	,011	,0009	,020	,0002	,660	,020	,500	,0030																																																																																						

ThyssenKrupp Steel Europe AG

Abnahme

- FOLGESEITE -

Werk-Nr.  
Works-No.  
No. de l'usine

A08  
4042011

Zaugs-Nr.  
Certificate-No.  
No de certificat

A03  
1715917001

Sendungs-Nr.  
Shipment-No.  
No d'envoi

45468446

Seite-Nr.  
Page-No.  
Page-No.

2

651475	NB	NI	TI	V	ZR								
	,028	,040	,005	,000	,000								
651475	,028	,040	,005	,000	,000								
682458	,003	1,800	,003	,080	,000								

C70 SCHMELZVERFAHREN OXYGENSTAHL  
C70 HEAT PROCESS OXYGEN STEEL

MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN ZUGVERSUCH  
MECHANICAL CHARACTERISTICS TENSILE TEST

B07	C00	C01/ 02	B05	C10	C03	C11	R	C12	R/L	L0	C13		
SCHM.-NR.	PROBE-NR.	LAGE	ZUST.	FORM	ALTER	TEMP	R	Rm	R/L	%	A	Rm*A	
						°C	MPa	MPa	%	mm	%		
651475	507661	0401	0005	0002	0006	+20	1042 RP0,2%	1079	97	90	12	13164	
651475	507661	0401	0005	0002	0006	+20	1057 RP0,2%	1086	96	90	14	15782	
682458	369631	0401	0005	0002	0006	+20	1003 RP0,2%	1056	95	200	18	19008	

MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN KERBSCHLAG BIEGEVERSUCH  
MECHANICAL CHARACTERISTICS IMPACT TEST

B07	C00	C01/ 02	B05	C40	C41	C03	C42	C42	C42	C43			
SCHM.-NR.	PROBE-NR.	LAGE	ZUST.	FORM	B mm	ALTER	PRUEF-TEMP.	ARBEIT [Joule]					
							°C	1	2	3	M		
651475	507661	0101	0005	0007	7,50	0006	-40	83	65	79	76		
651475	507661	0101	0005	0007	7,50	0006	-40	83	65	79	76		
682458	369631	0104	0005	0007	10,00	0006	-40	72	91	76	80		

WAERMEBEHANDLUNG PRODUKT  
HEAT TREATMENT PRODUCT

Pos.	TEMP °C	HALTEZEIT MIN.	ABKUEHLUNG	
	TEMP °C	HOLDTIME MIN.	COOL DOWN	
003	920	7,00	WASSER	WATER
	610	1,00	LUFT	AIR
014	920	7,00	WASSER	WATER
	640	15,00	LUFT	AIR

LEGENDEN  
LEGENDS

	ALTER	ART
	AGED	TYPE
0005 =	PROBENZUSTAND STAT. VERGUETET QUENCHED AND TEMPERED	PROBENLAGE (IST) POSIT (IST) LAENG KOPF OBERFLAECH LONG. TOP S 0104 = LAENG KOPF 1/4 T. LONG. TOP 1/4 T. 0401 = QUER KOPF OBERFLAECH TRANS. TOP S.
0006 =	ALTERUNG AGED UNGEALERT NOT AGED	PROBENFORM ZUGVERSUCH TYPE TENSILE TEST FLACHZUG FLAT TENSILE TEST
0007 =	PROBENFORM KERBSCHLAG TYPE IMPACT TEST CHARPY- V CHARPY- V	

ThyssenKrupp Steel Europe AG

Abnahme

- FOLGESEITE -



Werk-Nr. No. de l'usine	A08 4042011	Zertifikat-Nr. No de certificat	A03 1715917001	Sendungs-Nr. Shipment-No. No d'envoi	45468446	Seite-Nr. Page-No. Page-No.	3
----------------------------	----------------	------------------------------------	-------------------	--	----------	-----------------------------------	---

003, 014	L I E F E R E S T A N D   P R O D U K T S T A T U S   P R O D U C T
	VERGÜETET QUENCHED AND TEMPERED
	ERGEBNIS DER BESICHTIGUNG UND MASSPRÜFUNG: KEINE BEANSTANDUNG RESULT OF SURFACE CONTROL AND DIMENSIONAL CHECK: SATISFACTORY
	<p>A02 ABNAHMEBEAUFTRAGTER DES HERSTELLERS THE MANUFACTURER'S AUTHORIZED INSPECTION REPRESENTATIVE LE REPRÉSENTANT AUTORISÉ DU CONTRÔLEUR DU PRODUCTEUR</p> <p><i>Kern</i></p> <p>A03   Prof. Dr.-Ing. Kern</p>

ThyssenKrupp Steel Europe AG

Abnahme

A01

EUROPEAN STEEL INSTITUTE  
EUROPEAN ASSOCIATION OF STEEL MANUFACTURERS  
EUROPEAN ASSOCIATION OF STEEL PROCESSORS  
EUROPEAN ASSOCIATION OF STEEL TRADING COMPANIES  
EUROPEAN ASSOCIATION OF STEEL CONSUMERS



## 3.1-Zeugnis Schweißzusatzwerkstoff UP101-NiCrMo2,5

## Schweißdrähte / Welding Wires

**FLIESS**  
SINCE 1915

Fließ Eisenbergerstr. 85-93 47059 Duisburg  
Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt  
Mecklenburg-Vorpommern GmbH  
Alter Hafen Süd 4

18069 Rostock  
Deutschland

Abnahmeprüfzeugnis  
Inspection Certificate  
Certificat de réception  
EN 10 204-3.1

Datum: 14.07.2016  
Date/Date

Nr.: 2771/16

Bestell-Nr.:  
Order No./No. de commande

Unsere Auftrags-Nr.:  
Our order no./No. de commande d'usine

Qualität: UP-101 NiCrMo 2,5  
Quality/Qualité

Spulart: K415x100 25 kg  
Spooling/Rolage

Schmelz-Nr.: 280530  
Cast no./No. coulée

Bestelldatum: 14.07.2016  
date

Unsere Abteilung: QA / Si  
Our Department/notre département

Norm-Bezeichnung: EN ISO 26304-A 53Ni2,5CrMo  
Standard designation/norme

Abmessung: 2,4 mm  
Dimension/Dimension

Gewicht: 50 kg  
Weight/Poids

Chemische Zusammensetzung in % / Chemical composition / Composition chimique												
Schmelze	C	Si	Mn	P	S	Cu steel	Al	Cr	Mo	Ni	V	Ti
280530	0,14	0,16	1,32	0,007	0,008	0,028	0,002	0,58	0,91	2,55	0,005	0,001
	Nb	Co	Pb	Sn	B	As	Zr	Ta	Sb	Ce	N mill	O
280530	0,002			0,003		0,002			0,0010		0,0041	

Mechanische Eigenschaften des reinen Schweißgutes DIN EN 1597-1 Werkzeugeignis EN 10 204-2.2							
mechanical properties of pure weld metal DIN EN 1597-1 test report EN 10 204-2.2 / propriétés mécaniques de soudage pur/metal DIN EN 1597-1 relevé de com/EN 10 204-2.2							
Re bzw. Rp0,2		Rm		A5		Av	
min	result	min	result	min	result	min	result

HERMANN FLIESS & CO. GMBH  
Qualitätsstelle  
QA Dept.

*Slavko Šimunović*

Slavko Šimunović

Hermann Fließ & Co. GmbH  
Eisenberger Str. 85-93  
47059 Duisburg / Germany  
+49 203 51906-0 - fax: 50  
info@fließ.de - www.fließ.de

National-Bank Duisburg  
IBAN: DE56 0002 0330 0005 0751 10 BIC: NTA2 2333  
Commerzbank Duisburg  
IBAN: DE51 2509 0330 0001 8375 00 BIC: COBA 3333 XXX  
Handelsregister Duisburg HRB-Nr. 2555

Deutsche Bank Duisburg  
IBAN: DE38 3507 0030 0017 5267 00 BIC: DEUT 3333  
Postbank Essen  
IBAN: DE36 3801 0043 0002 8854 00 BIC: PBNK 3333  
Geschäftsführer: Henning H. Fließ - Alexander H. Fließ

## Datenblatt Schweißpulver OP121TT [9]

### OP 121TT



Schweißpulver  
Aluminat- und fluoridbasierte Schweißpulver

OP 121TT ist ein voll basisches agglomeriertes Schweißpulver zum Schweißen von Feinkornstählen wenn höchste Ansprüche an die Schweißnaht insbesondere an deren Zähigkeit oder CTOD Beständigkeit gestellt werden. OP 121TT wird mit einem großen Spektrum von OERLIKON Schweißdrähten, insbesondere mit OE-SD3, eingesetzt. Mit diesen Drähten liegen Erfahrungen bei der Herstellung von Offshore Plattformen, Decks, Pfeilern und Knotenpunkten vor. Ebenso wird OP 121TT verwendet zur Herstellung dickwandiger Komponenten in der Nukleartechnik und im Behälterbau.

OP 121TT weist einen sehr geringen diffusiblen Wasserstoff nach der Herstellung auf. Ebenso verläuft die Feuchtigkeitsaufnahme bei der Verwendung sehr langsam. Beim Schweißen mit OP 121TT bildet sich ein sehr stabiler Lichtbogen. Dieser liefert eine ebenmäßige und feinschuppige Schweißnaht deren Schlacke sich sehr gut löst. OP 121TT kann an Gleichstrom und Wechselstrom sowie mit allen Hochleistungsverfahren wie Doppeldraht, Tandem und Mehrdrahtsystemen eingesetzt werden.

OP 121TT ist für Anwendungen, die eine extrem geringe Konzentration von Phosphor und Schwefel im Schweißgut erfordern, auch als OP 121TT/W verfügbar.

Körnung gemäß EN 760: 2-20

Normbezeichnungen		
	EN ISO	14174: SA FB 1 55 A0 H5
OE-S1 CrMo2	AWS	A5.28: F8P2-EB3-B3
OE-S2 CrMo1	AWS	A5.28: F8P4-EB2R-B2
OE-S2 Mo	AWS	A5.28: F8A4-EA2-A2
OE-S2 Mo	AWS	A5.28: F8P4-EA2-A2
OE-S2 Ni2	AWS	A5.28: F7A10-ENI2-NI2
OE-S2 Ni2	AWS	A5.28: F7P10-ENI2-NI2
OE-SD3 Mo	AWS	A5.28: F8A8-EA4-A4
OE-SD3 Mo	AWS	A5.28: F8P8-EA4-A4
OE-TIBOR 22	AWS	A5.28: F7A8-E8-G
OE-TIBOR 33	AWS	A5.28: F8A8-E8-G
OE-S2	AWS	A5.17: F8P8-EM12K
OE-S2	AWS	A5.17: F7A8-EM12K
OE-SD3	AWS	A5.17: F7A8-EH12K
OE-SD3	AWS	A5.17: F7P8-EH12K
OE-SD3 1Ni ½Mo	AWS	A5.28: F8A10-E8-G
OE-SD3 1Ni ½Mo	AWS	A5.28: F8P10-E8-G
OE-SD3 1Ni ½Mo	AWS	A5.28: F9A8-EF3/EG-F3
OE-SD3 1Ni ½Mo	AWS	A5.28: F9P8-EF3/EG-F3
OE-SD3 2NiCrMo	AWS	A5.28: F11A8-E8-G
OE-SD3 2NiCrMo	AWS	A5.28: F11P5-E8-G

Zulassungen		Grad
OE-S2 Mo	ABS	SYM-SYT
FLUXOCCORD 81	DB	●
FLUXOCCORD 81HD	DB	●
FLUXOCCORD 42	DB	●
OE-S2 Mo	DB	●
OE-S2 Ni2	DNV	SYM H5, SYT H5
OE-S2 Ni2	GL	In Progress
OE-S2 Mo	LRS	3Y40T, 4Y40M H5
FLUXOCCORD 81HD	LRS	4Y
FLUXOCCORD 41	TÜV	●
OE-S1 CrMo2	TÜV	●
OE-S2 CrMo1	TÜV	●
OE-S2 Mo	TÜV	●
OE-S2 Ni1	TÜV	●
OE-S2 Ni2	TÜV	●
OE-S2 Ni3	TÜV	●
OE-SD3 Mo	TÜV	●
OE-S2	LRS	3M, 3YM
OE-S2	TÜV	●
OE-S3	DB	●
OE-S3	TÜV	●
OE-SD3	ABS	5YQ420 H5
OE-SD3	BV	5Y42M H5
OE-SD3	DB	●
OE-SD3	DNV	5Y42M H5
OE-SD3	GL	6Y42M H5
OE-SD3	LRS	5Y42M H5
OE-SD3	RMRS	5Y40M HHH
OE-SD3	TÜV	●
OE-SD3 1Ni ½Mo	ABS	4Y Q480M
OE-SD3 1Ni ½Mo	DB	●
OE-SD3 1Ni ½Mo	TÜV	●
OE-SD3 1Ni ½Mo	ABS	5Y Q550M
OE-SD3 1Ni ½Mo	DNV	5Y55M H5
OE-SD3 1Ni ½Mo	LRS	5Y50M H5
OE-SD3 1Ni ½Mo	TÜV	●
OE-SD3 2NiCrMo	ABS	5Y Q690M
OE-SD3 2NiCrMo	DB	●
OE-SD3 2NiCrMo	DNV	5Y69M H5
OE-SD3 2NiCrMo	LRS	5Y69M H5
OE-SD3 2NiCrMo	TÜV	●

**OP 121TT**

Schweißpulver  
Aluminat- und fluoridbasierte Schweißpulver

**Hauptbestandteile des Pulvers**

CaO + MgO	35 %
CaF <sub>2</sub>	25 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + MnO	20 %
SiO <sub>2</sub> + TiO <sub>2</sub>	15 %

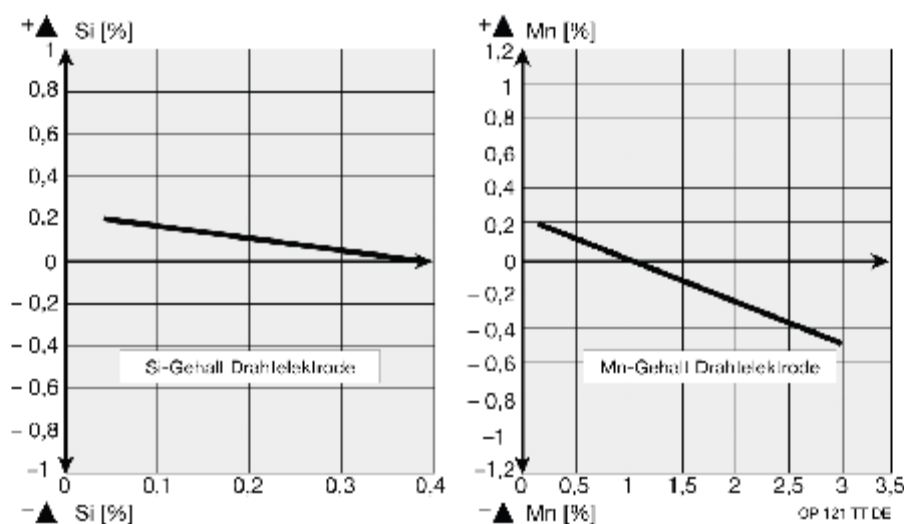
# OP 121TT



Schweißpulver  
Aluminat- und fluorbasische Schweißpulver

## METALLURGISCHES VERHALTEN

Zu- und Abbrand der Legierungselemente Si und Mn = f (Legierungsgehalt der Drahtelektrode)  
DVS-Merkblatt 0907 Teil 1



### Chemische Zusammensetzung (typische Werte in %)

		C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Ti	B
Reines Schweißgut	OE-S1 OrMo2	0.08	0.8	0.8	2.2	-	1	-	-
Reines Schweißgut	OE-S2 OrMo1	0.07	0.9	0.8	1.1	-	0.5	-	-
Reines Schweißgut	OE-S2 Mo	0.07	0.9	0.2	-	-	0.5	-	-
Reines Schweißgut	OE-S2 Ni2	0.07	0.9	0.8	-	2.8	-	-	-
Reines Schweißgut	OE-S2 Ni3	0.08	0.9	0.2	-	8.8	-	-	-
Reines Schweißgut	OE-SD3 Mo	0.07	1.8	0.2	-	-	0.5	-	-
Reines Schweißgut	OE-TiBOR 22	0.08	1	0.1	-	-	0.8	0.018	0.0010
Reines Schweißgut	OE-TiBOR 88	0.07	1.2	0.8	-	-	0.5	0.15	0.012
Reines Schweißgut	OE-S2	0.07	0.9	0.2	-	-	-	-	-
Reines Schweißgut	OE-SD3	0.07	1.8	0.8	-	-	-	-	-
Reines Schweißgut	OE-SD3 1Ni ½Mo	0.07	1.8	0.8	-	0.9	0.2	-	-
Reines Schweißgut	OE-SD3 1Ni ½Mo	0.07	1.5	0.8	-	0.95	0.5	-	-
Reines Schweißgut	OE-SD3 2NiOrMo	0.07	1.4	0.4	0.6	2.2	0.5	-	-

**OP 121TT**

Schweißpulver  
Aluminat- und fluoridbasierte Schweißpulver

**Mechanische Eigenschaften des reinen Schweißgutes**

	Wärmebehandlung	Streckgrenze (MPa)	Zugfestigkeit (MPa)	Dehnung (%) A5 (%)
OE-S1 CrMo2	720°Cx8h	≥ 450	550-650	≥ 22
OE-S1 CrMo2	840°C/air+740°C	≥ 400	520-620	≥ 22
OE-S2 CrMo1	680°Cx2h	≥ 380	530-630	≥ 24
OE-S2 CrMo1	920°C/air+710°C	≥ 310	430-530	≥ 30
OE-S2 Mo	Unbehandelt	≥ 470	550-680	≥ 24
OE-S2 Ni2	Unbehandelt	≥ 450	550-600	≥ 24
OE-S2 Ni2	600°Cx2h	≥ 430	500-600	≥ 26
OE-S2 Ni3	Unbehandelt	≥ 480	560-680	≥ 25
OE-SD3 Mo	Unbehandelt	≥ 550	610-670	≥ 29
OE-SD3 Mo	620°Cx1h	≥ 520	600-680	≥ 27
OE-TIBOR 22		≥ 430	500-650	≥ 20
OE-TIBOR 33		≥ 530	580-700	≥ 20
OE-S2	Unbehandelt	≥ 380	450-550	≥ 28
OE-SD3	Unbehandelt	≥ 450	530-630	≥ 25
OE-SD3	600°Cx2h	≥ 400	480-590	≥ 27
OE-SD3 1Ni ½Mo	Unbehandelt	≥ 500	560-680	≥ 22
OE-SD3 1Ni ½Mo	600°Cx2h	≥ 470	550-680	≥ 24
OE-SD3 1Ni ½Mo	Unbehandelt	≥ 550	650-750	≥ 20
OE-SD3 1Ni ½Mo	600°Cx2h	≥ 540	630-730	≥ 22
OE-SD3 2NiCrMo	Unbehandelt	≥ 720	780-900	≥ 18
OE-SD3 2NiCrMo	580°Cx2h	≥ 600	700-850	≥ 19

**OP 121TT**

Schweißpulver  
Aluminat- und fluoridbasierte Schweißpulver

**Mechanische Eigenschaften des reinen Schweißgutes - Kerbschlagarbeit ISO-V**

	Wärmebehandlung	Kerbschlagarbeit (J)				
		0 °C	-20 °C	-40 °C	-60 °C	-80 °C
OE-S1 CrMo2	720°Cx8h	≥ 100				
OE-S1 CrMo2	940°C/air+740°C	≥ 90				
OE-S2 CrMo1	680°Cx2h	≥ 180				
OE-S2 CrMo1	920°C/air+710°C	≥ 200				
OE-S2 Mo	Unbehandelt	≥ 120	≥ 100	≥ 50		
OE-S2 Ni2	Unbehandelt	≥ 140	≥ 120	≥ 100	≥ 70	≥ 50
OE-S2 Ni2	600°Cx2h	≥ 160	≥ 140	≥ 130	≥ 100	≥ 80
OE-S2 Ni8	Unbehandelt	≥ 160	≥ 140	≥ 130	≥ 100	≥ 80
OE-SD8 Mo	Unbehandelt			≥ 110	≥ 80	
OE-SD8 Mo	620°Cx1h			≥ 130	≥ 80	
OE-TIBOR 22					≥ 50	
OE-TIBOR 33				≥ 50		
OE-S2	Unbehandelt	≥ 160	≥ 100	≥ 50		
OE-SD8	Unbehandelt	≥ 180		≥ 100	≥ 70	
OE-SD8	600°Cx2h	≥ 200		≥ 120	≥ 90	
OE-SD8 1Ni ½Mo	Unbehandelt			≥ 145	≥ 70	
OE-SD8 1Ni ½Mo	600°Cx2h			≥ 160	≥ 70	
OE-SD8 1Ni ½Mo	Unbehandelt	≥ 120	≥ 90	≥ 70	≥ 47	
OE-SD8 1Ni ½Mo	600°Cx2h	≥ 140	≥ 120	≥ 90	≥ 70	
OE-SD8 2NiCrMo	Unbehandelt				≥ 69	
OE-SD8 2NiCrMo	580°Cx2h			≥ 47		

**OP 121TT**

Schweißpulver  
Aluminat- und fluoridbasierte Schweißpulver

**Typische Anwendungen**

	Werkstoffe
OE-S2 Mo	ASME: X80, X85, ASTM A355 Gr. F1; A182M Gr. F1 EN: 16Mo3, S(P)355-S(P)460, L245-L450
OE-S2 Ni3	ASME: ASTM A333 Grade 3, ASTM A334 Grade 3; A352L03; ASTM A203 D, E EN: 12Ni14, S(P)275-S(P)460
OE-TIBOR 22	ASME: X70; S(P)420-S(P)460; L245-L485
OE-S2 CrMo1	ASME: A199 and A200 grade T11, A213 Grades T11, T12 EN: 13CrMo4-5, 13CrMo5-5
OE-S2 Ni2	EN: 11MnNi5-3, 15NiMn5-3
OE-TIBOR 33	ASME: X70, X80; S(P)420-S(P)500; L245-L550
OE-TIBOR 22	ASME: X70; S(P)420-S(P)460; L245-L485
OE-TIBOR 33	ASME: X70, X80; S(P)420-S(P)500; L245-L550
OE-TIBOR 22	ASME: X70; S(P)420-S(P)460; L245-L485
OE-TIBOR 33	ASME: X70, X80; S(P)420-S(P)500; L245-L550
OE-S2	ASME: ASTM A181 Grades A, B, D, D0; A253 all Grades; A529 Grades 42, 50; A570 all Grades; A572 Grades 42, 50; A709 Grades 33, 50 EN: S(P)235-S(P)355; L245-L380
OE-S03	ASME: A516 all Grades EN: S(P)235-S(P)420
OE-S03 1Ni ½Mo	ASME: ASTM A181 AH40, DH40, EH40, X85, X70 EN: S(P)275-S(P)460
OE-S03 1Ni ½Mo	ASME: X70, X80, N-A-XTRA 55, HY80, QINEN EN: S(P)420-S(P)500; L245-L485; 20MnMoNi5-5, 15NiCuMoNb5

**Rücktrocknen**

300-350°Cx2-4h

**Strom**

AC; DC+

**Lieferform**

gemäß Kapitel "Lieferform" und Preistabelle



## Anlagen, Teil 2

Dieses Kapitel enthält die Prüfprotokolle der Vorversuche:

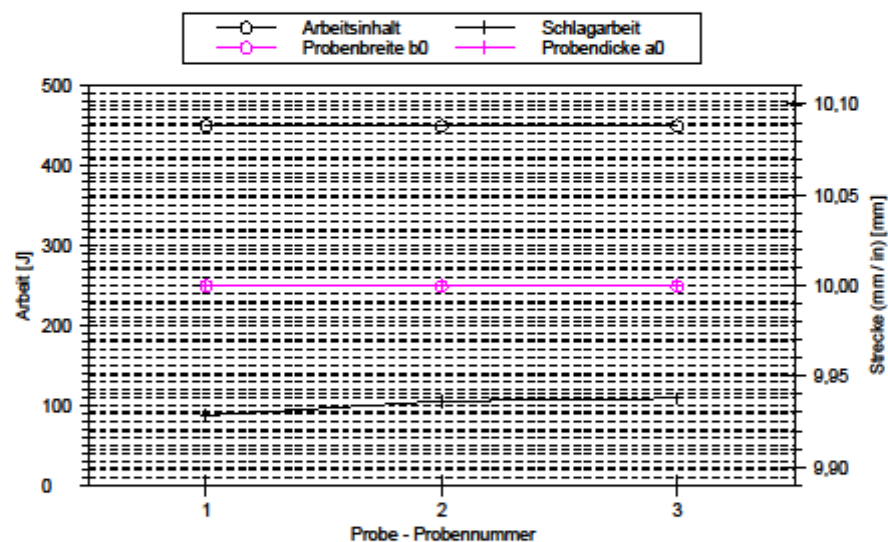
- Protokolle der Kerbschlagbiegeversuche
- Protokolle der Zugversuche
- Protokolle der Härteprüfung
- Makroschliffbilder
- Mikroschliffbilder

**Protokolle Kerbschlagbiegeversuche****Kerbschlag-Biegeversuch****05.04.2016****Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SG
Probenname	: Probe 1	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	87,62	19,47	Charpy
2	10	10	450,00	105,15	23,37	Charpy
3	10	10	450,00	109,30	24,29	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

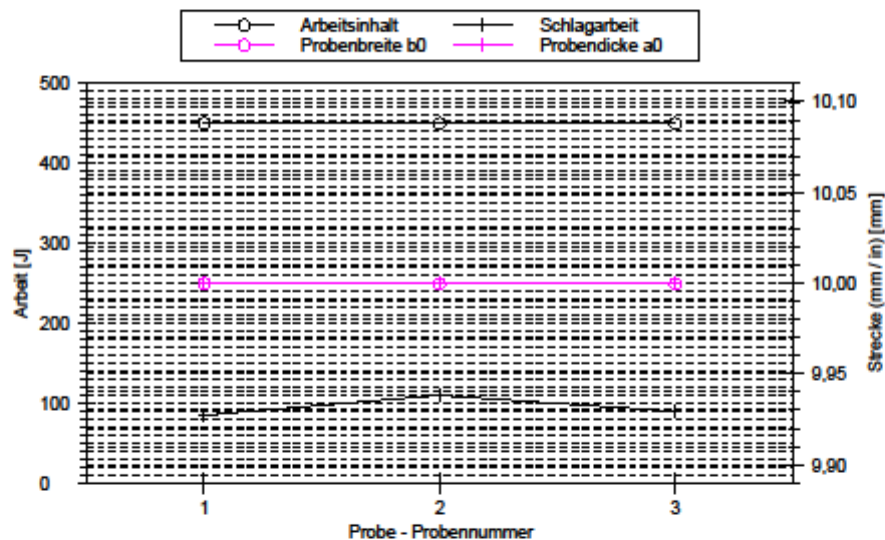
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	100,69	22,37
s	0,000	0	0,00	11,51	2,58
v	0,00	0,00	0,00	11,43	11,43

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SL
Probenname	: Probe 1	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	85,00	18,89	Charpy
2	10	10	450,00	109,66	24,37	Charpy
3	10	10	450,00	89,60	19,91	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

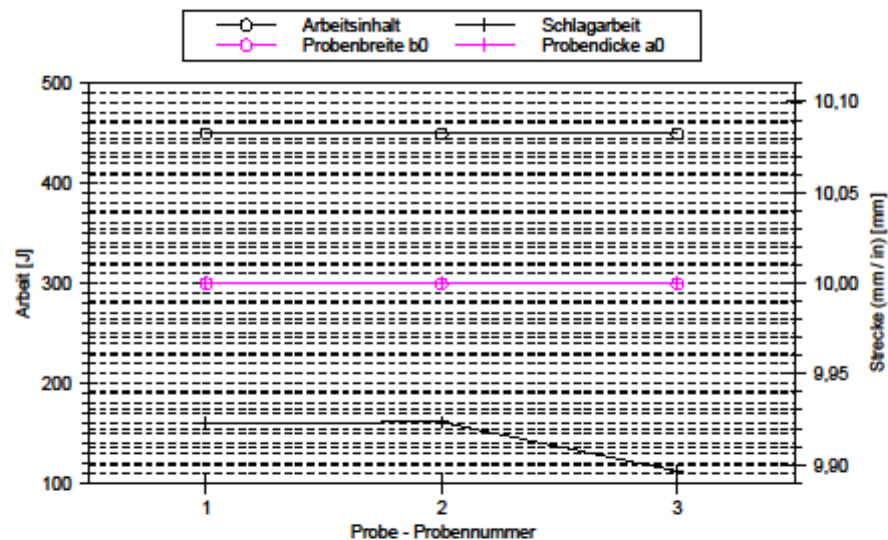
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	94,75	21,06
s	0,000	0	0,00	13,11	2,91
v	0,00	0,00	0,00	13,84	13,84

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SL+2mm
Probenname	: Probe 1	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	160,54	35,68	Charpy
2	10	10	450,00	160,90	35,76	Charpy
3	10	10	450,00	112,41	24,98	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

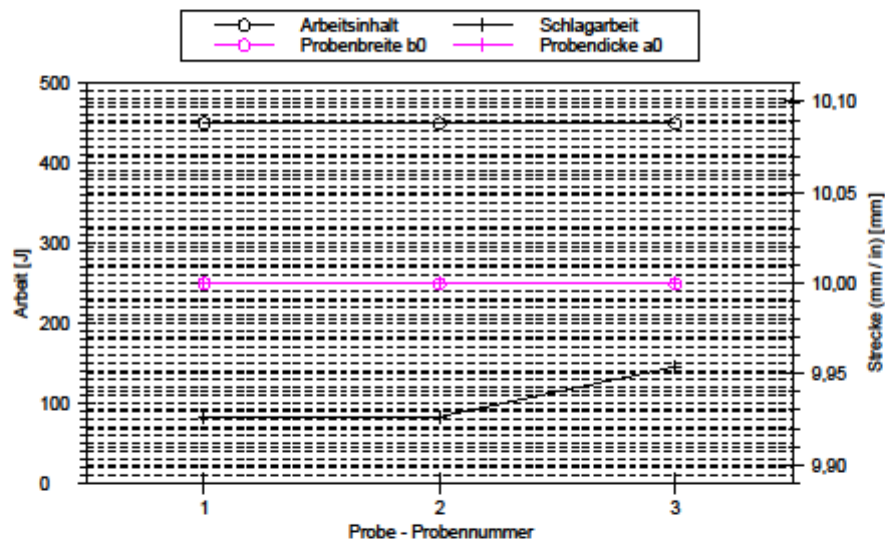
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	144,81	32,14
s	0,000	0	0,00	27,89	6,20
v	0,00	0,00	0,00	19,29	19,29

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980Q
SLV-Kundenr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SL+5mm
Probenname	: Probe 1	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	82,07	18,24	Charpy
2	10	10	450,00	82,75	18,39	Charpy
3	10	10	450,00	145,04	32,23	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

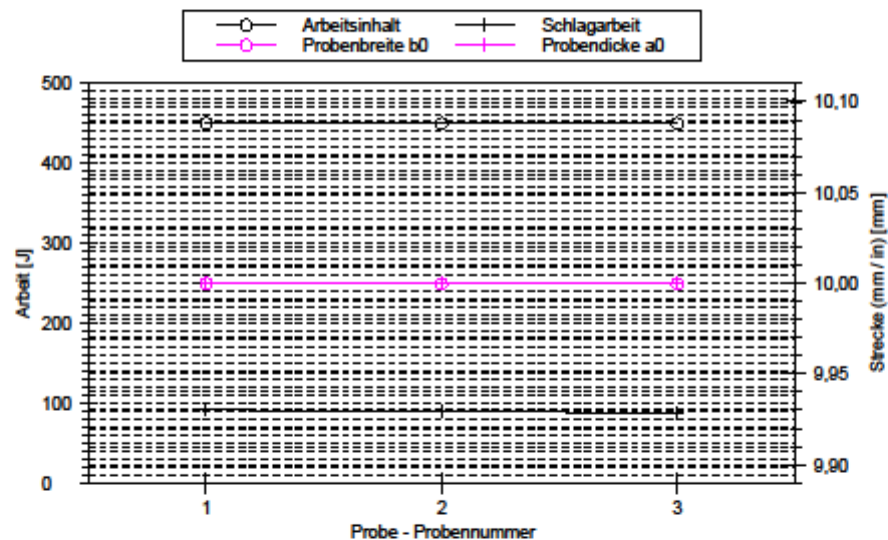
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	103,29	22,95
s	0,000	0	0,00	36,16	8,04
v	0,00	0,00	0,00	35,01	35,01

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SG
Probenname	: Probe 1	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	91,27	20,28	Charpy
2	10	10	450,00	90,28	20,06	Charpy
3	10	10	450,00	86,99	19,33	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

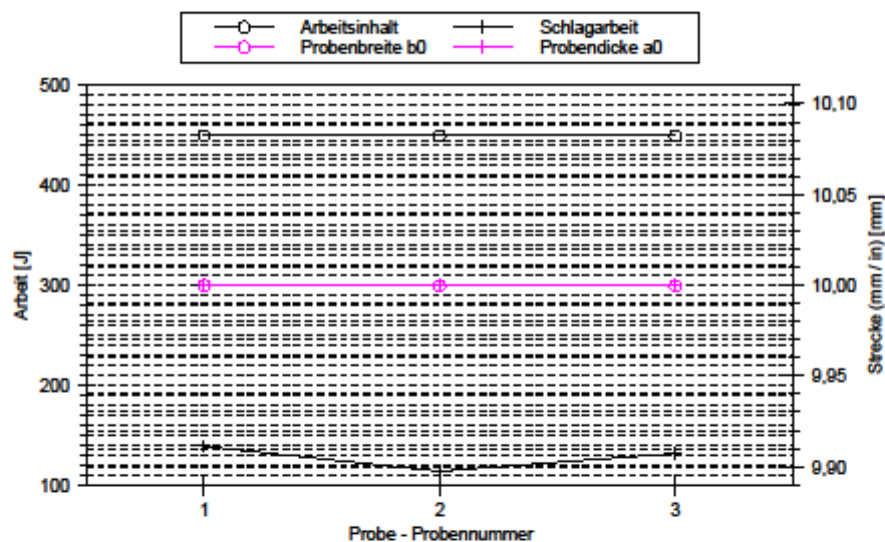
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	89,51	19,89
s	0,000	0	0,00	2,24	0,50
v	0,00	0,00	0,00	2,50	2,50

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980Q
SLV-Kundenr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SL
Probenname	: Probe 1	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	139,18	30,93	Charpy
2	10	10	450,00	114,16	25,37	Charpy
3	10	10	450,00	131,56	29,24	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

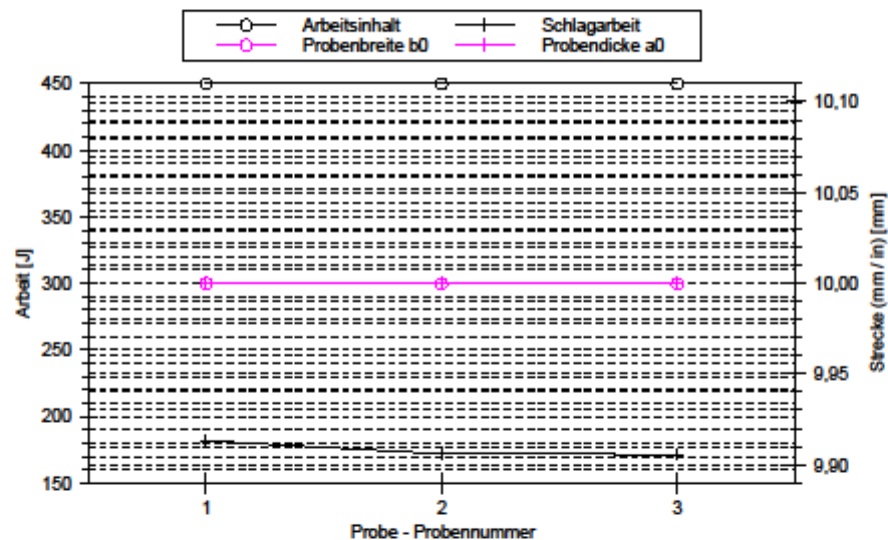
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	128,30	28,51
s	0,000	0	0,00	12,82	2,85
v	0,00	0,00	0,00	9,99	9,99

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SL+2mm
Probenname	: Probe 1	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	181,54	40,34	Charpy
2	10	10	450,00	171,76	38,17	Charpy
3	10	10	450,00	171,40	38,09	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	174,90	38,87
s	0,000	0	0,00	5,75	1,28
v	0,00	0,00	0,00	3,29	3,29

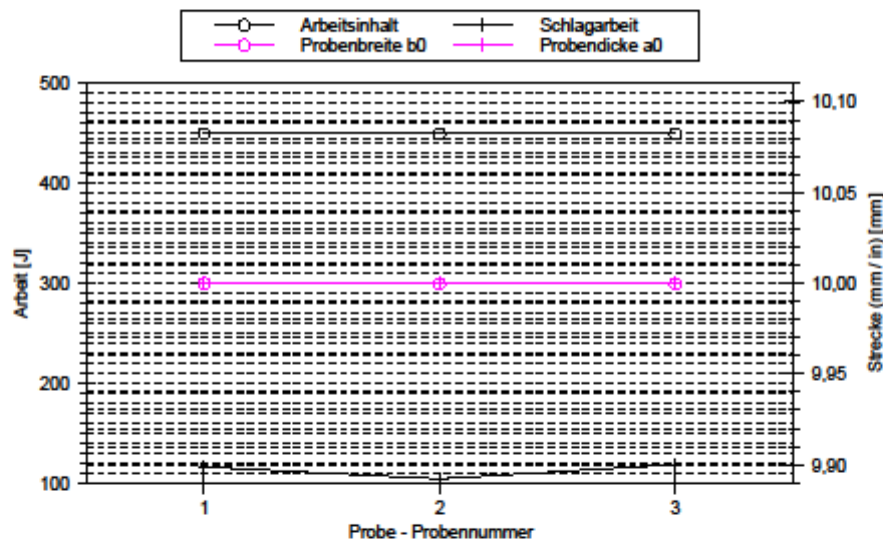


**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960Q
SLV-Kundenr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SL+5mm
Probenname	: Probe 1	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	115,92	25,76	Charpy
2	10	10	450,00	104,11	23,14	Charpy
3	10	10	450,00	118,40	26,31	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

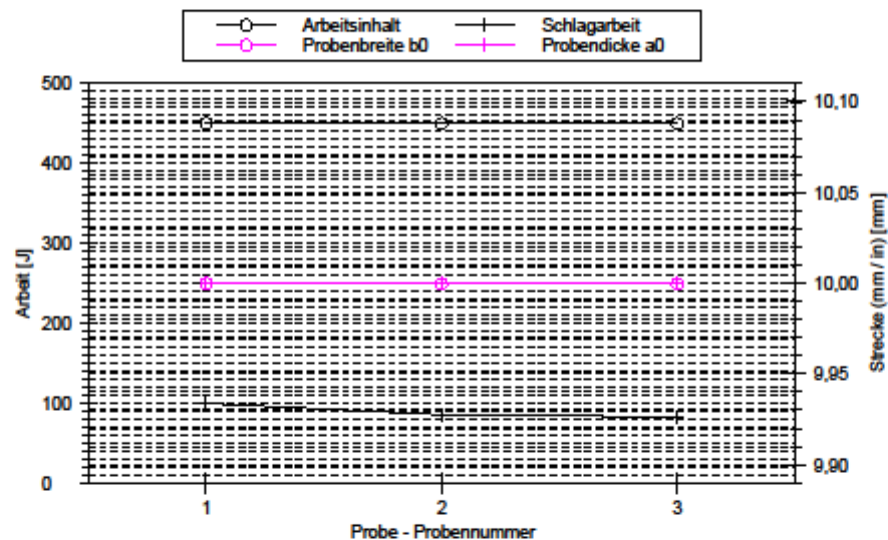
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	112,81	25,07
s	0,000	0	0,00	7,63	1,70
v	0,00	0,00	0,00	6,77	6,77

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SG
Probenname	: Probe 2	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	99,70	22,15	Charpy
2	10	10	450,00	85,68	19,04	Charpy
3	10	10	450,00	82,75	18,39	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

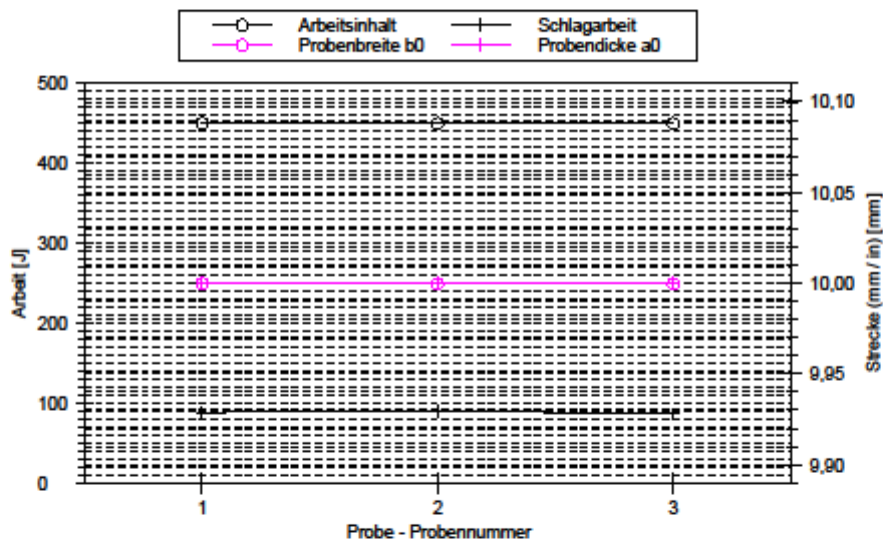
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	89,37	19,86
s	0,000	0	0,00	9,06	2,01
v	0,00	0,00	0,00	10,14	10,14

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SL
Probenname	: Probe 2	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	88,29	19,62	Charpy
2	10	10	450,00	90,59	20,13	Charpy
3	10	10	450,00	85,99	19,11	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

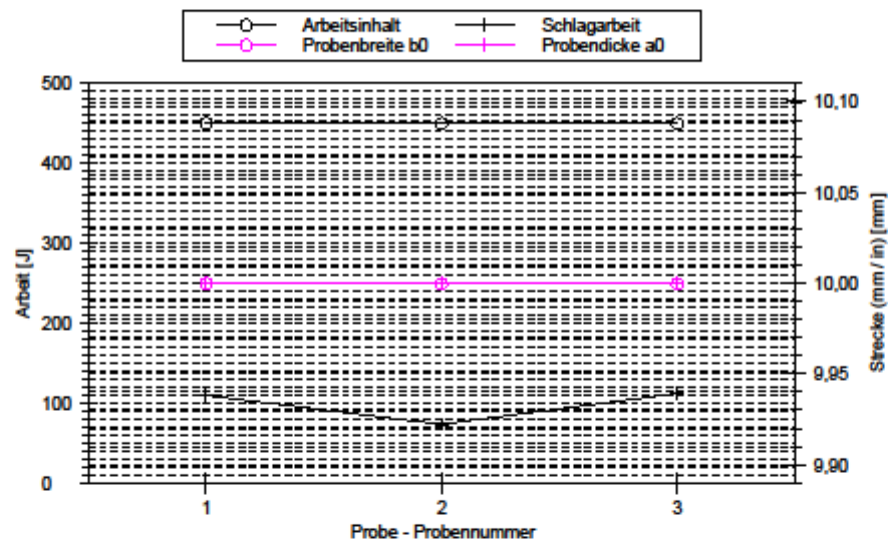
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	88,29	19,62
s	0,000	0	0,00	2,30	0,51
v	0,00	0,00	0,00	2,60	2,60

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SL+2mm
Probenname	: Probe 2	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	109,68	24,37	Charpy
2	10	10	450,00	73,73	16,39	Charpy
3	10	10	450,00	112,09	24,91	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

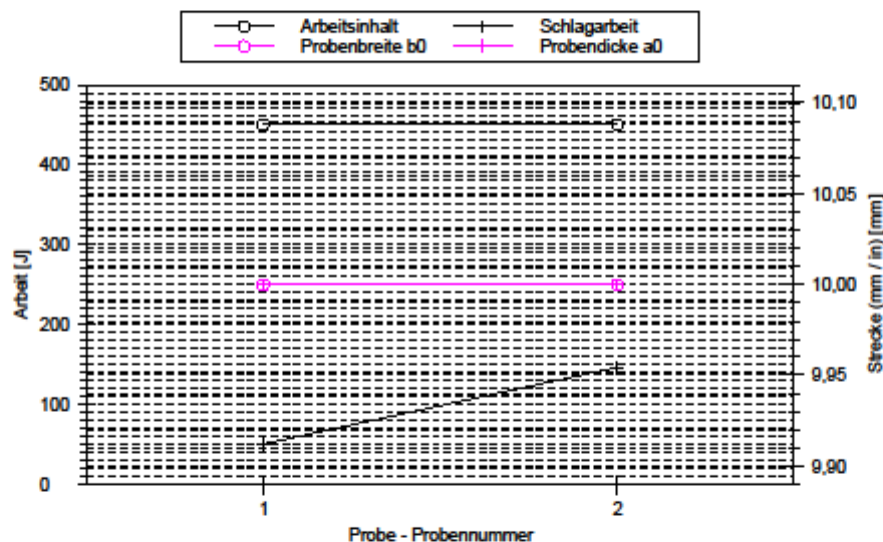
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	98,49	21,89
s	0,000	0	0,00	21,48	4,77
v	0,00	0,00	0,00	21,81	21,81

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SL+5mm
Probenname	: Probe 2	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse: Wert 3 nicht übernommen = 150J**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	49,89	11,09	Charpy
2	10	10	450,00	146,12	32,47	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

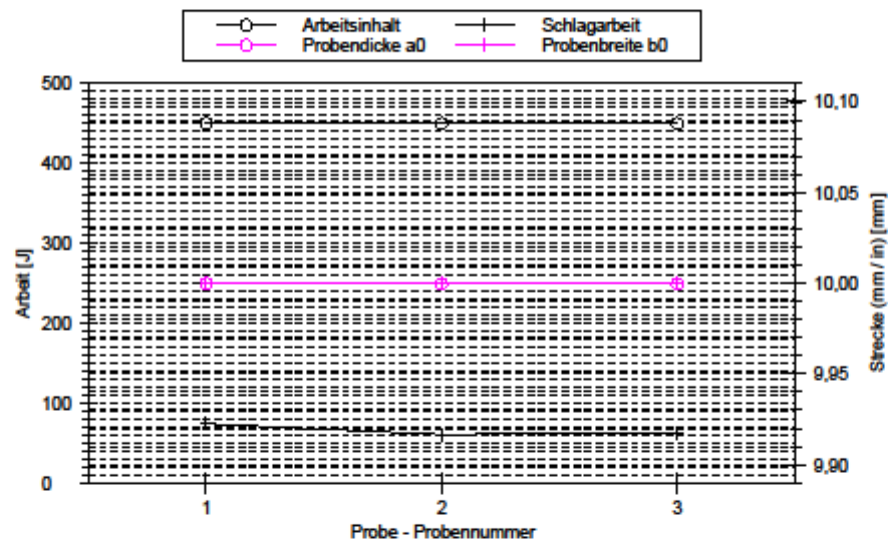
Serie n = 2	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	98,00	21,78
s	0,000	0	0,00	68,05	15,12
v	0,00	0,00	0,00	69,43	69,43

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SG
Probenname	: Probe 2	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	74,05	16,46	Charpy
2	10	10	450,00	61,07	13,57	Charpy
3	10	10	450,00	62,91	13,98	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

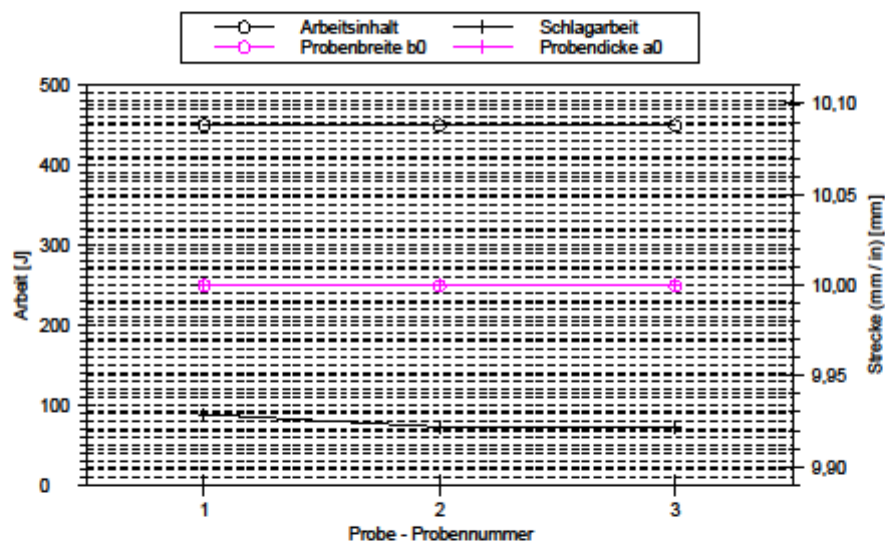
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	66,01	14,67
s	0,000	0	0,00	7,02	1,56
v	0,00	0,00	0,00	10,64	10,64

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SL
Probenname	: Probe 2	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	88,61	19,69	Charpy
2	10	10	450,00	73,10	16,24	Charpy
3	10	10	450,00	72,16	16,03	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

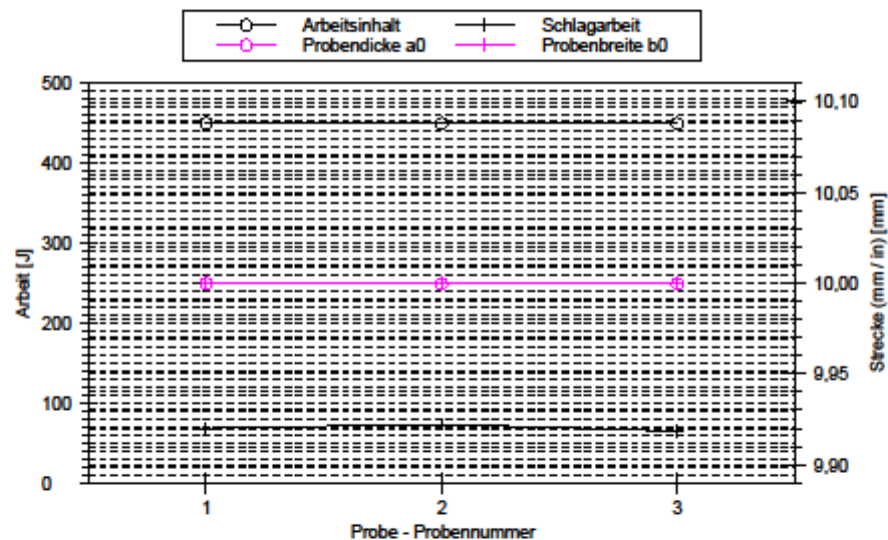
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	77,96	17,32
s	0,000	0	0,00	9,24	2,05
v	0,00	0,00	0,00	11,85	11,85

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SL+2mm
Probenname	: Probe 3	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	68,73	15,27	Charpy
2	10	10	450,00	73,42	16,32	Charpy
3	10	10	450,00	71,52	15,89	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	69,08	15,35
s	0,000	0	0,00	4,20	0,93
v	0,00	0,00	0,00	6,08	6,08

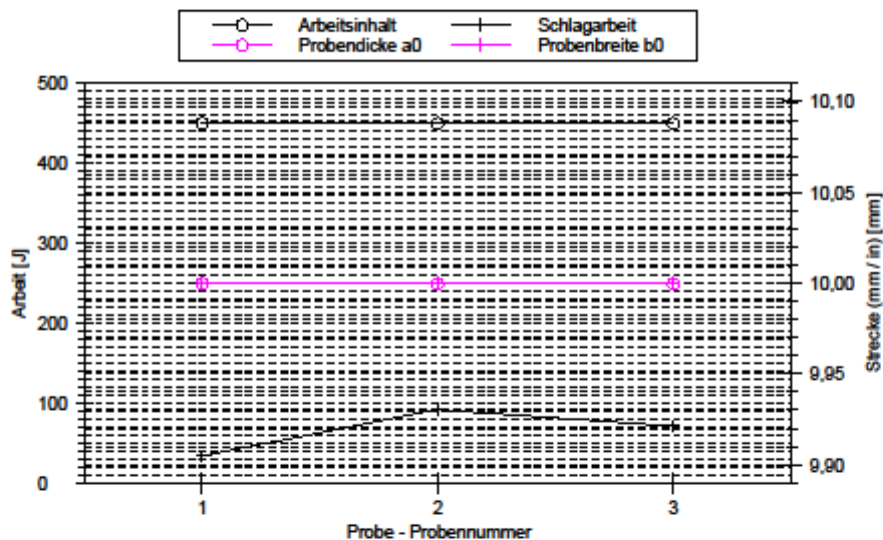


**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SL+5mm
Probenname	: Probe 2	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	33,88	7,53	Charpy
2	10	10	450,00	91,94	20,43	Charpy
3	10	10	450,00	65,03	14,45	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

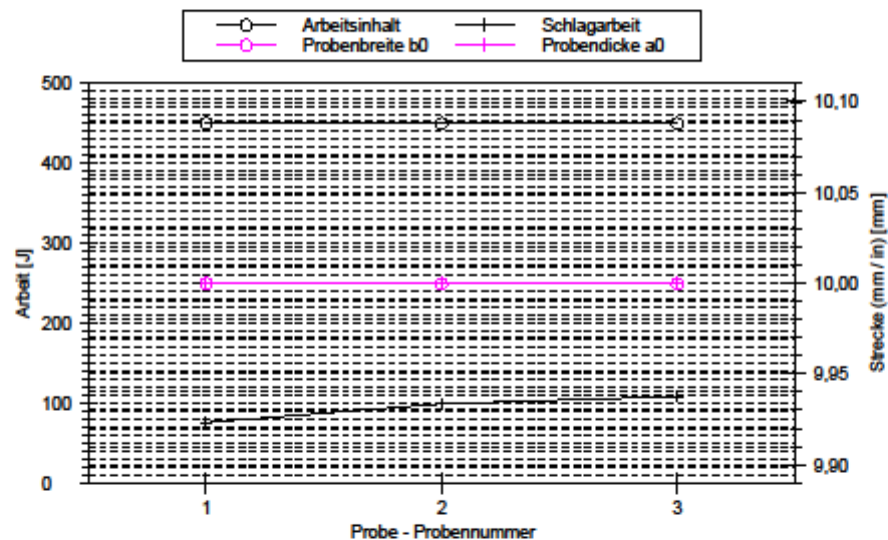
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	65,78	14,62
s	0,000	0	0,00	29,45	6,55
v	0,00	0,00	0,00	44,78	44,78

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SG
Probenname	: Probe 3	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	75,67	16,82	Charpy
2	10	10	450,00	99,02	22,00	Charpy
3	10	10	450,00	108,26	24,06	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

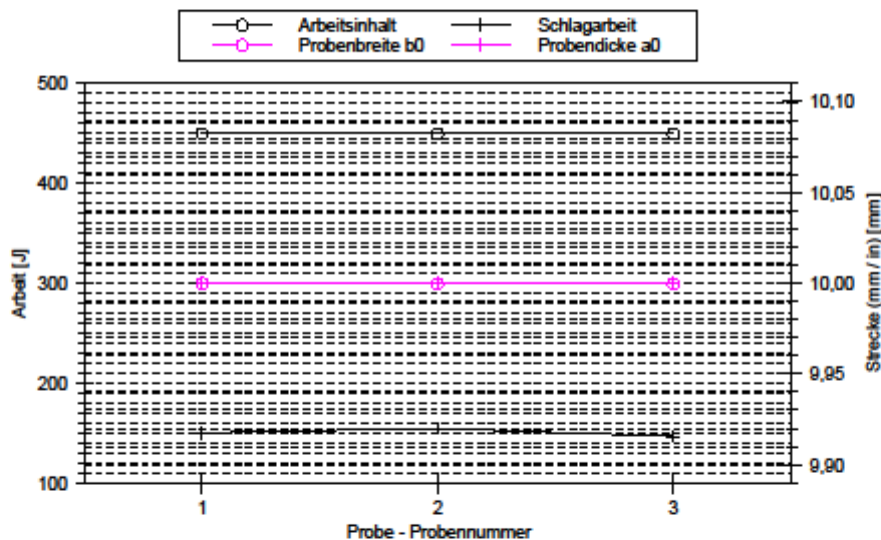
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	94,32	20,96
s	0,000	0	0,00	16,80	3,73
v	0,00	0,00	0,00	17,81	17,81

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960Q
SLV-Kundenr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SL
Probenname	: Probe 3	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	150,53	33,45	Charpy
2	10	10	450,00	154,59	34,35	Charpy
3	10	10	450,00	146,84	32,63	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

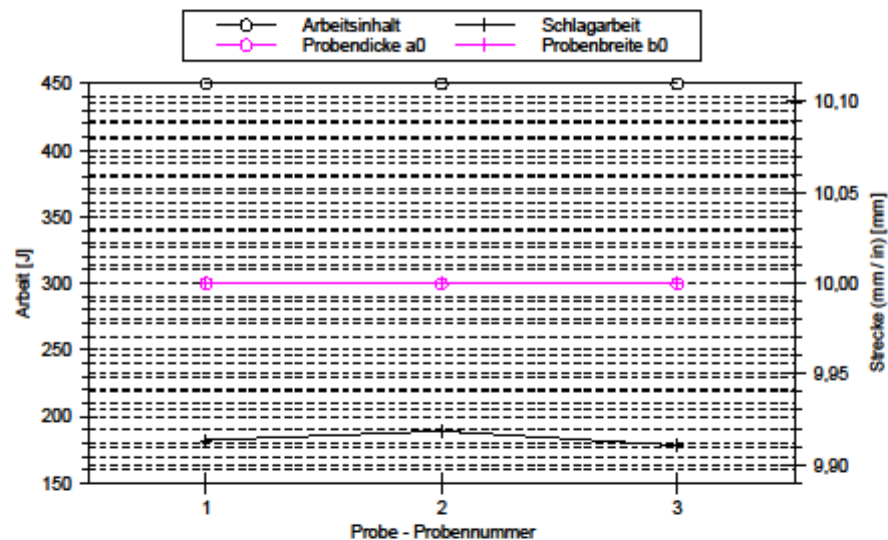
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	150,65	33,48
s	0,000	0	0,00	3,88	0,86
v	0,00	0,00	0,00	2,57	2,57

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SL+2mm
Probenname	: Probe 3	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	182,30	40,51	Charpy
2	10	10	450,00	189,11	42,02	Charpy
3	10	10	450,00	178,16	39,59	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

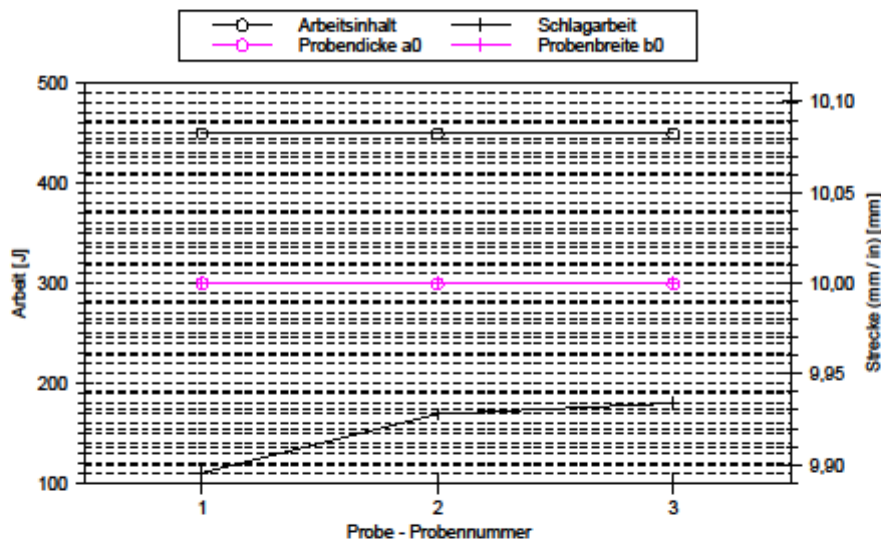
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	183,19	40,71
s	0,000	0	0,00	5,53	1,23
v	0,00	0,00	0,00	3,02	3,02

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980Q
SLV-Kundenr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SL+5mm
Probenname	: Probe 3	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	109,97	24,44	Charpy
2	10	10	450,00	169,15	37,59	Charpy
3	10	10	450,00	179,65	39,92	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

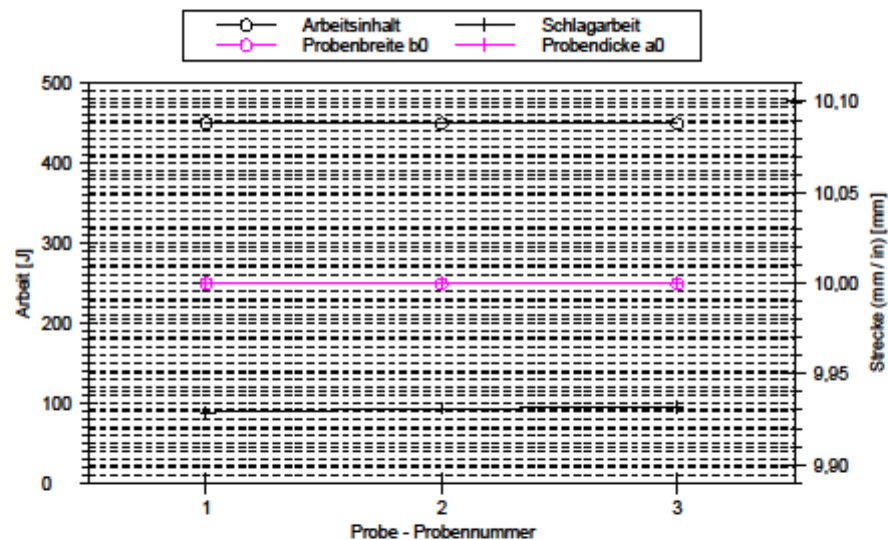
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	152,92	33,98
s	0,000	0	0,00	37,56	8,35
v	0,00	0,00	0,00	24,56	24,56

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SG
Probenname	: Probe 3	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	88,29	19,62	Charpy
2	10	10	450,00	93,61	20,80	Charpy
3	10	10	450,00	93,93	20,87	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

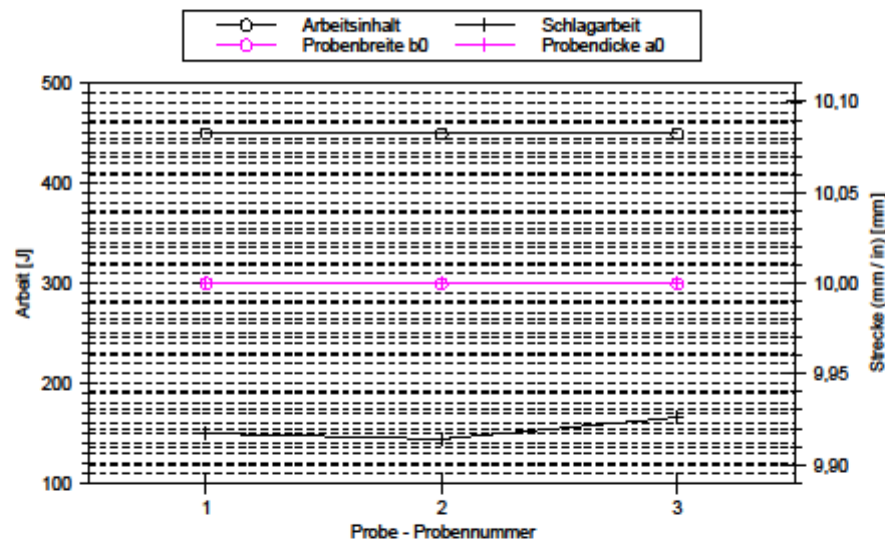
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	91,94	20,43
s	0,000	0	0,00	3,17	0,70
v	0,00	0,00	0,00	3,44	3,44

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980Q
SLV-Kundenr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SL
Probenname	: Probe 3	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	149,81	33,29	Charpy
2	10	10	450,00	144,27	32,06	Charpy
3	10	10	450,00	165,77	36,84	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

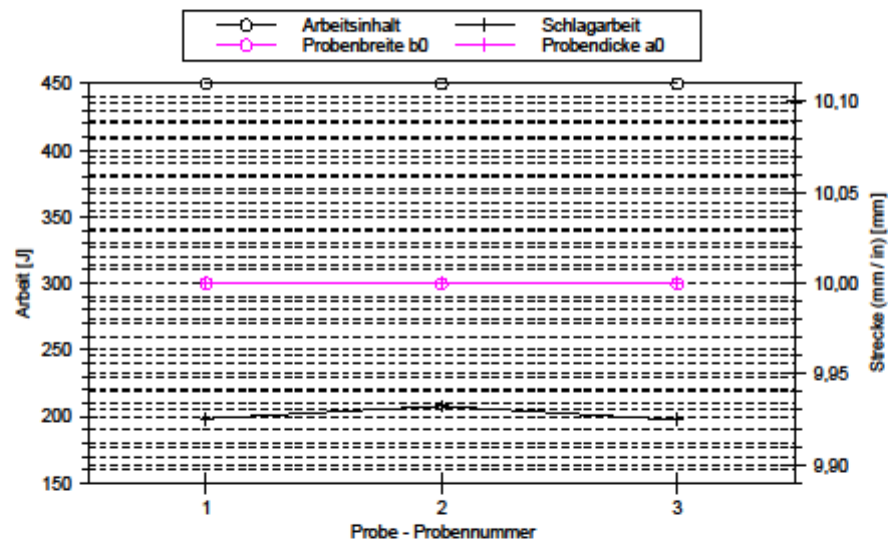
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	153,28	34,06
s	0,000	0	0,00	11,16	2,48
v	0,00	0,00	0,00	7,28	7,28

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SL+2mm
Probenname	: Probe 3	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	198,57	44,13	Charpy
2	10	10	450,00	207,68	46,15	Charpy
3	10	10	450,00	197,40	43,87	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	201,22	44,71
s	0,000	0	0,00	5,62	1,25
v	0,00	0,00	0,00	2,80	2,80

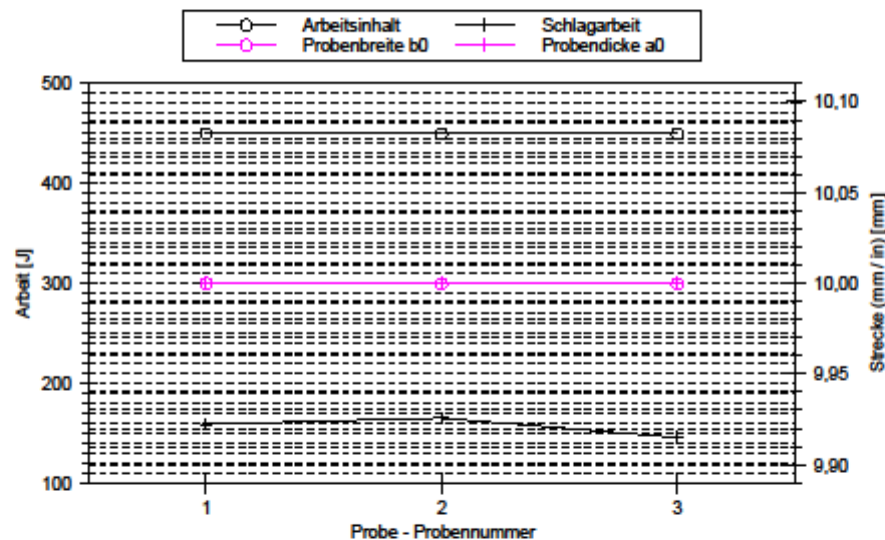


**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960Q
SLV-Kundenr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SL+5mm
Probenname	: Probe 3	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	159,05	35,34	Charpy
2	10	10	450,00	165,00	36,67	Charpy
3	10	10	450,00	145,76	32,39	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

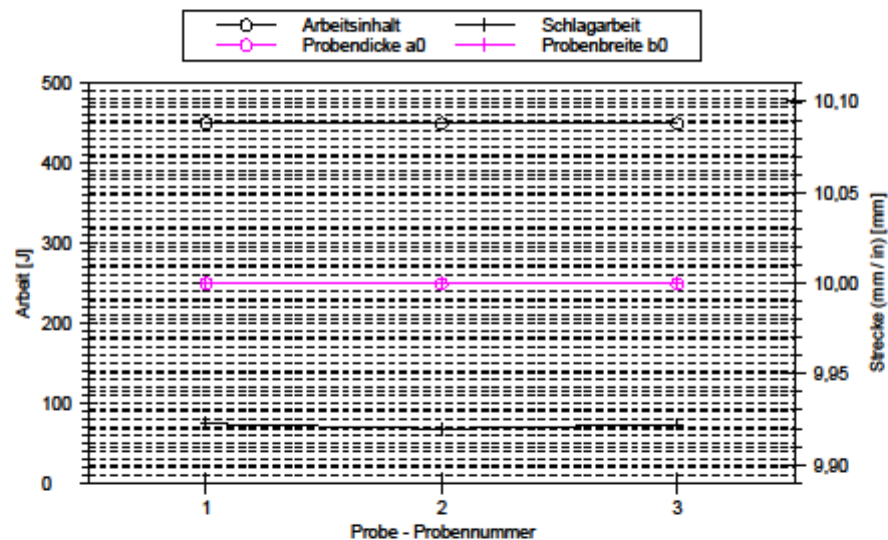
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	158,80	34,80
s	0,000	0	0,00	9,85	2,19
v	0,00	0,00	0,00	6,29	6,29

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SG
Probenname	: Probe 4	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	74,05	16,46	Charpy
2	10	10	450,00	67,51	15,00	Charpy
3	10	10	450,00	73,42	16,32	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

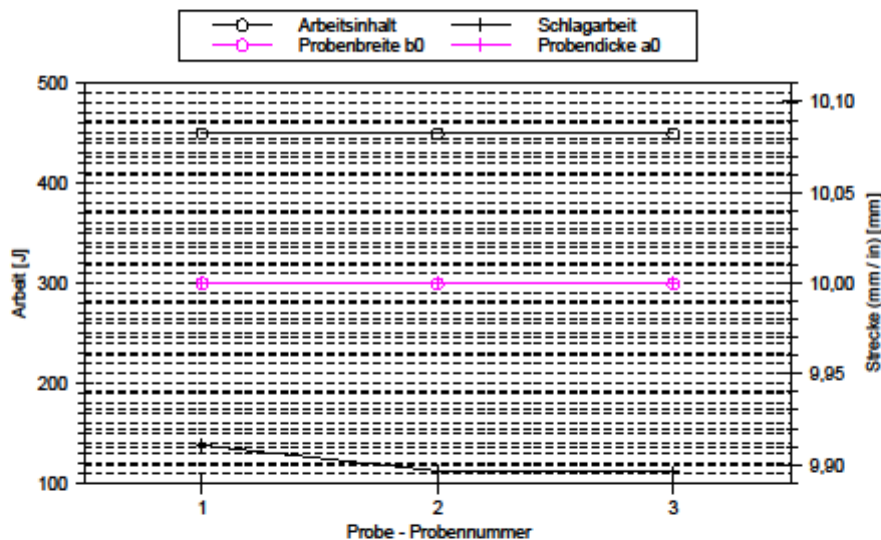
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	71,66	15,92
s	0,000	0	0,00	3,61	0,80
v	0,00	0,00	0,00	5,03	5,03

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SL
Probenname	: Probe 4	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	137,73	30,61	Charpy
2	10	10	450,00	112,41	24,98	Charpy
3	10	10	450,00	111,01	24,67	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

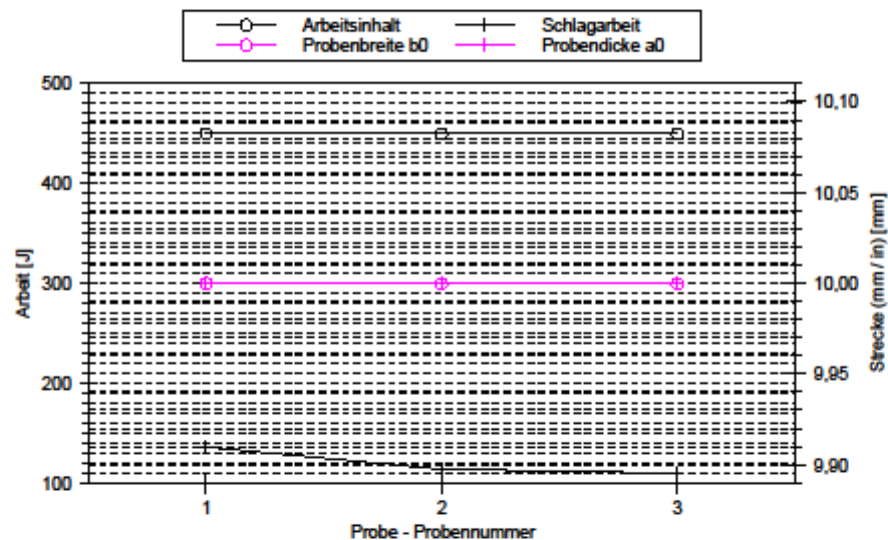
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	120,38	26,75
s	0,000	0	0,00	15,04	3,34
v	0,00	0,00	0,00	12,50	12,50

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SL+2mm
Probenname	: Probe 4	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	136,29	30,29	Charpy
2	10	10	450,00	114,16	25,37	Charpy
3	10	10	450,00	109,97	24,44	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

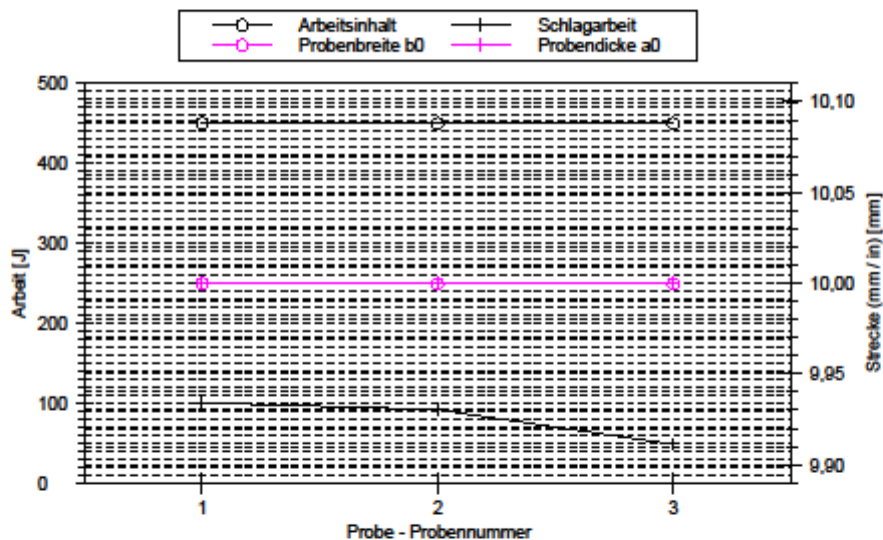
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	120,14	26,70
s	0,000	0	0,00	14,14	3,14
v	0,00	0,00	0,00	11,77	11,77

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980Q
SLV-Kundenr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SL+5mm
Probenname	: Probe 4	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	100,37	22,30	Charpy
2	10	10	450,00	92,26	20,50	Charpy
3	10	10	450,00	48,71	10,83	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

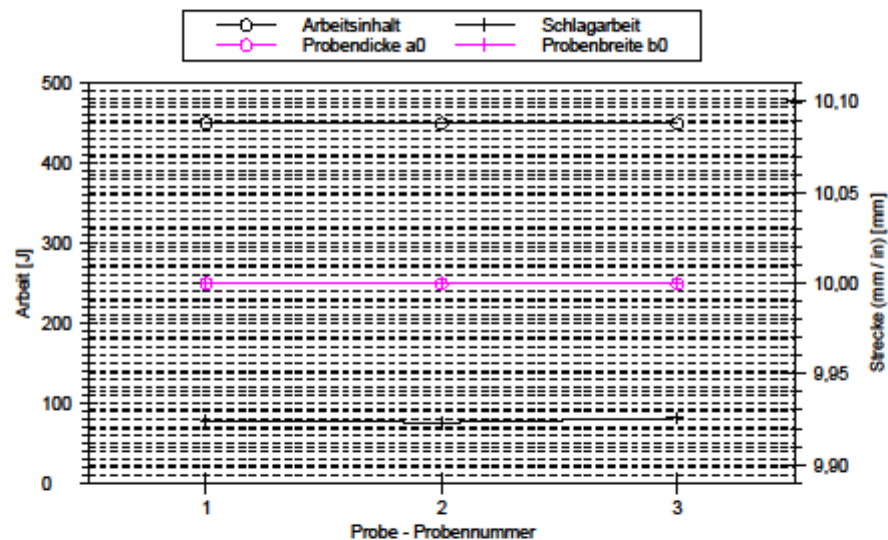
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	80,45	17,88
s	0,000	0	0,00	27,78	6,17
v	0,00	0,00	0,00	34,53	34,53

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SG
Probenname	: Probe 4	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	78,20	17,38	Charpy
2	10	10	450,00	75,99	16,89	Charpy
3	10	10	450,00	81,44	18,10	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

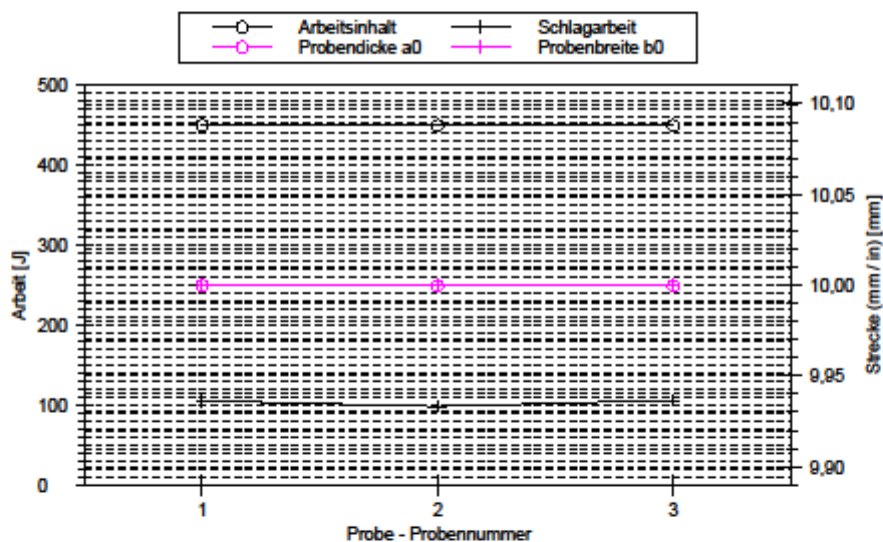
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	78,54	17,45
s	0,000	0	0,00	2,74	0,61
v	0,00	0,00	0,00	3,49	3,49

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SL
Probenname	: Probe 4	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	105,51	23,45	Charpy
2	10	10	450,00	98,66	21,92	Charpy
3	10	10	450,00	106,19	23,60	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

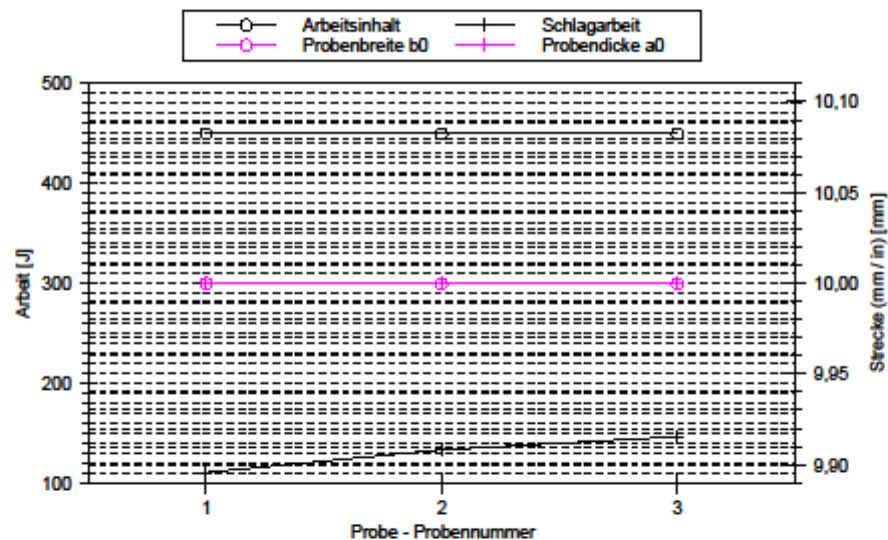
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	103,45	22,99
s	0,000	0	0,00	4,16	0,93
v	0,00	0,00	0,00	4,03	4,03

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SL+2mm
Probenname	: Probe 4	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	110,69	24,60	Charpy
2	10	10	450,00	133,36	29,64	Charpy
3	10	10	450,00	146,12	32,47	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	130,06	28,90
s	0,000	0	0,00	17,94	3,99
v	0,00	0,00	0,00	13,80	13,80

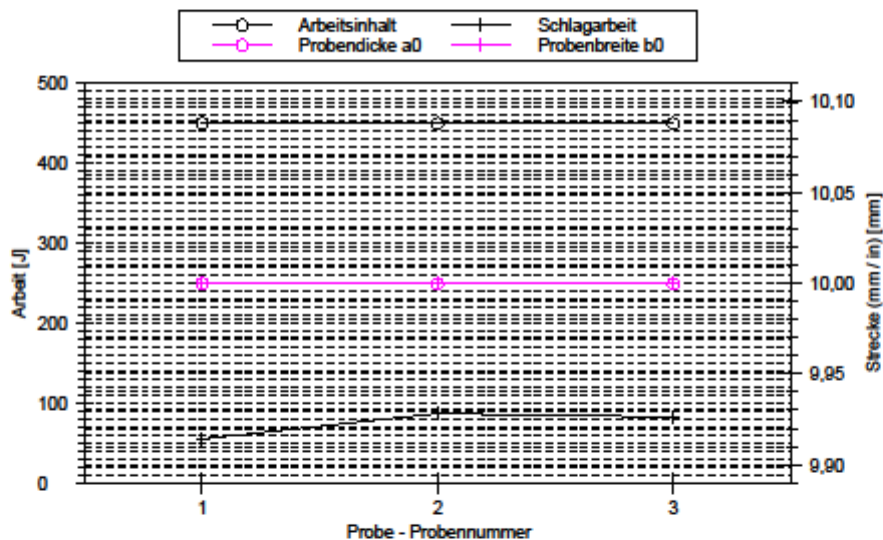


**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SL+5mm
Probenname	: Probe 4	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	55,39	12,31	Charpy
2	10	10	450,00	86,67	19,26	Charpy
3	10	10	450,00	82,39	18,31	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

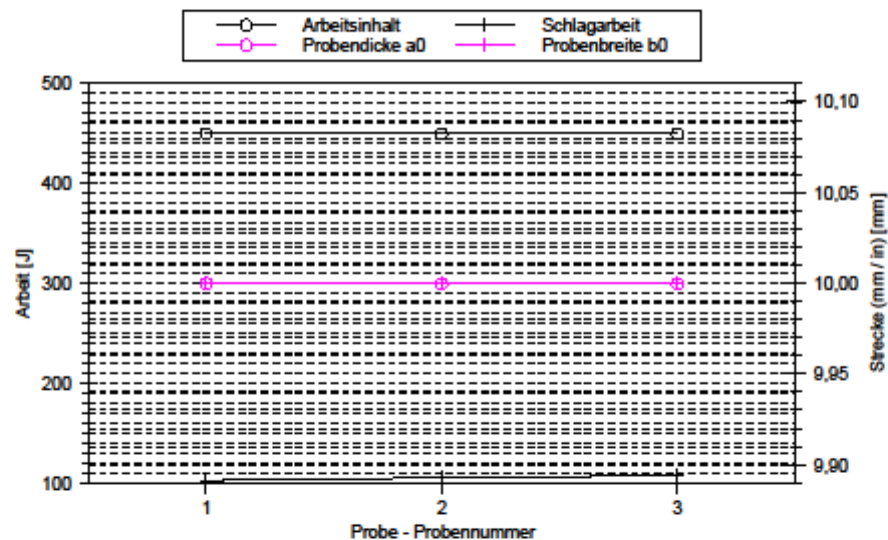
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	74,81	16,63
s	0,000	0	0,00	16,96	3,77
v	0,00	0,00	0,00	22,67	22,67

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SG
Probenname	: Probe 5	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	102,76	22,84	Charpy
2	10	10	450,00	105,15	23,37	Charpy
3	10	10	450,00	107,90	23,98	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

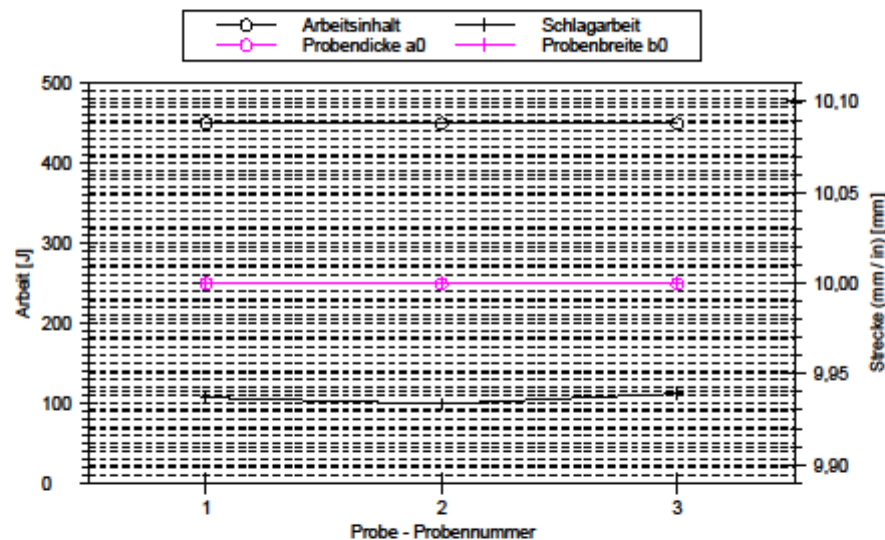
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	105,27	23,39
s	0,000	0	0,00	2,57	0,57
v	0,00	0,00	0,00	2,44	2,44

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SL
Probenname	: Probe 5	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	107,22	23,83	Charpy
2	10	10	450,00	99,34	22,07	Charpy
3	10	10	450,00	111,73	24,83	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

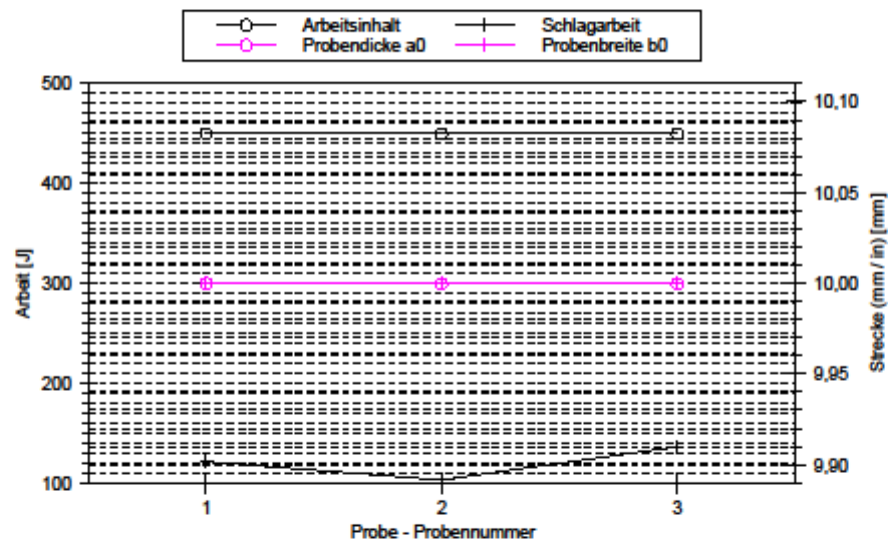
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	108,10	23,58
s	0,000	0	0,00	6,27	1,39
v	0,00	0,00	0,00	5,91	5,91

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SL+2mm
Probenname	: Probe 5	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	121,19	26,93	Charpy
2	10	10	450,00	103,08	22,91	Charpy
3	10	10	450,00	135,93	30,21	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

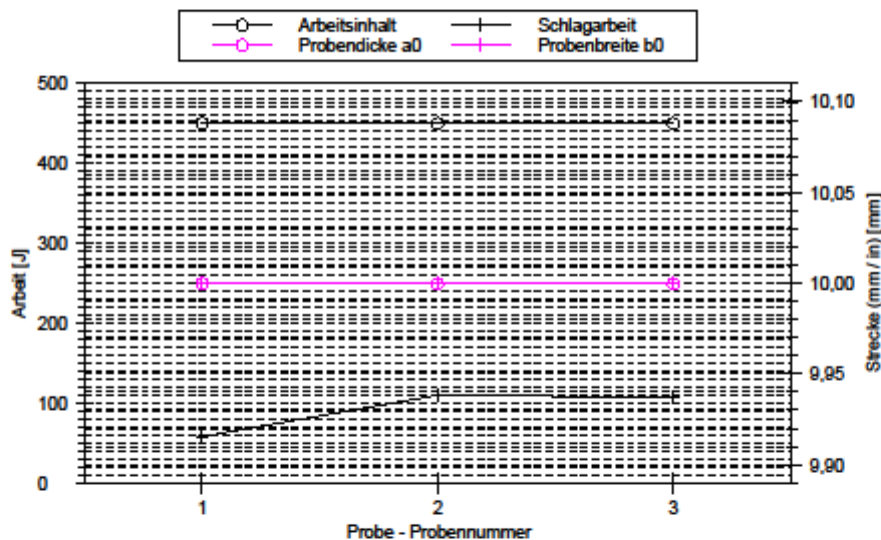
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	120,07	26,68
s	0,000	0	0,00	16,46	3,66
v	0,00	0,00	0,00	13,71	13,71

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980Q
SLV-Kundenr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SL+5mm
Probenname	: Probe 5	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	57,78	12,84	Charpy
2	10	10	450,00	109,66	24,37	Charpy
3	10	10	450,00	107,90	23,98	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

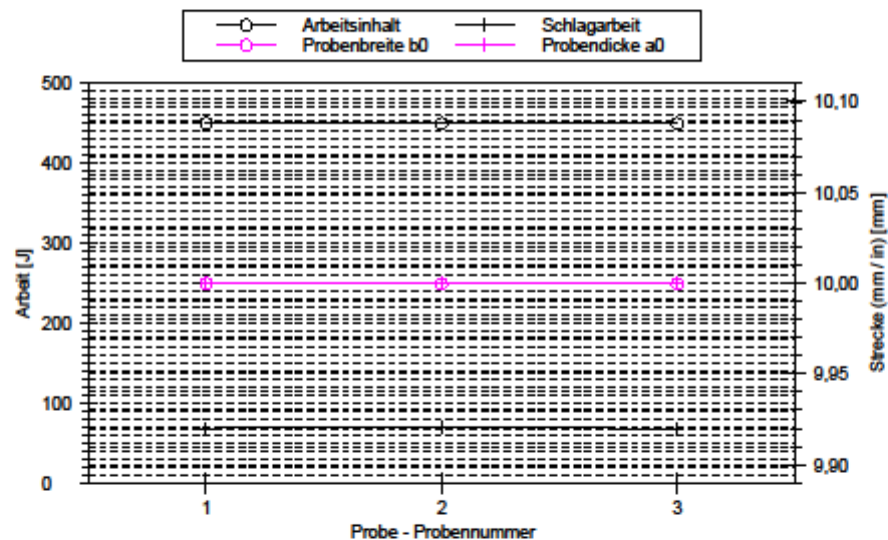
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	91,78	20,39
s	0,000	0	0,00	29,46	6,55
v	0,00	0,00	0,00	32,10	32,10

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SG
Probenname	: Probe 5	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	68,41	15,20	Charpy
2	10	10	450,00	70,62	15,69	Charpy
3	10	10	450,00	67,83	15,07	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

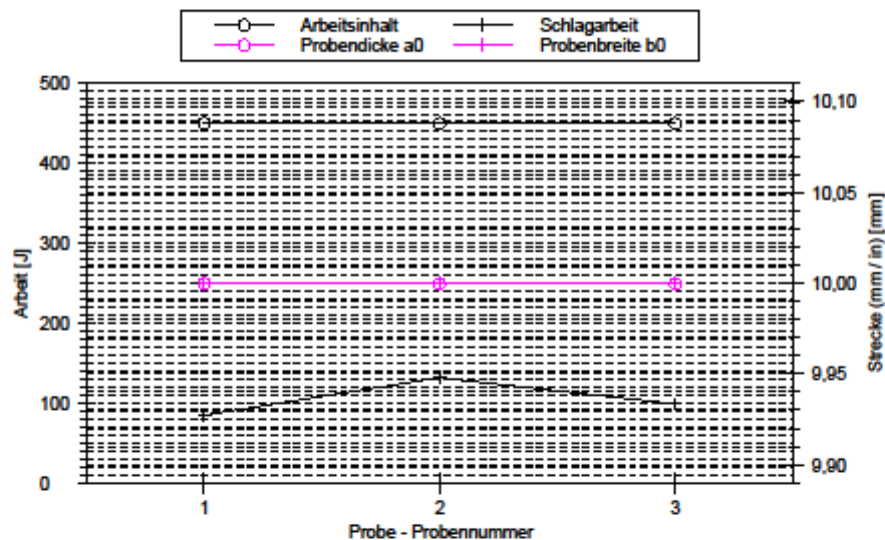
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	68,96	15,32
s	0,000	0	0,00	1,47	0,33
v	0,00	0,00	0,00	2,14	2,14

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SL
Probenname	: Probe 5	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	85,00	18,89	Charpy
2	10	10	450,00	131,92	29,32	Charpy
3	10	10	450,00	99,02	22,00	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

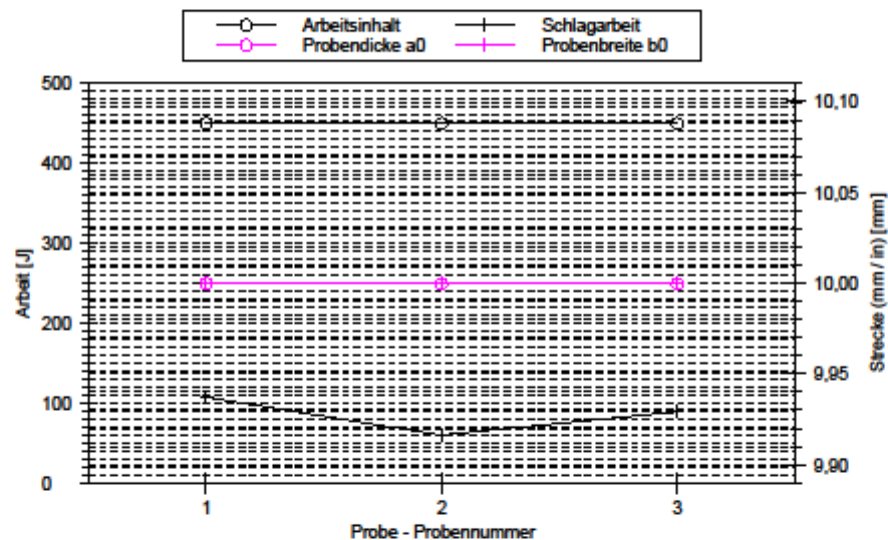
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	105,31	23,40
s	0,000	0	0,00	24,08	5,35
v	0,00	0,00	0,00	22,87	22,87

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SL+2mm
Probenname	: Probe 5	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	107,54	23,90	Charpy
2	10	10	450,00	80,16	13,37	Charpy
3	10	10	450,00	89,28	19,84	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	85,66	19,04
s	0,000	0	0,00	23,89	5,31
v	0,00	0,00	0,00	27,89	27,89

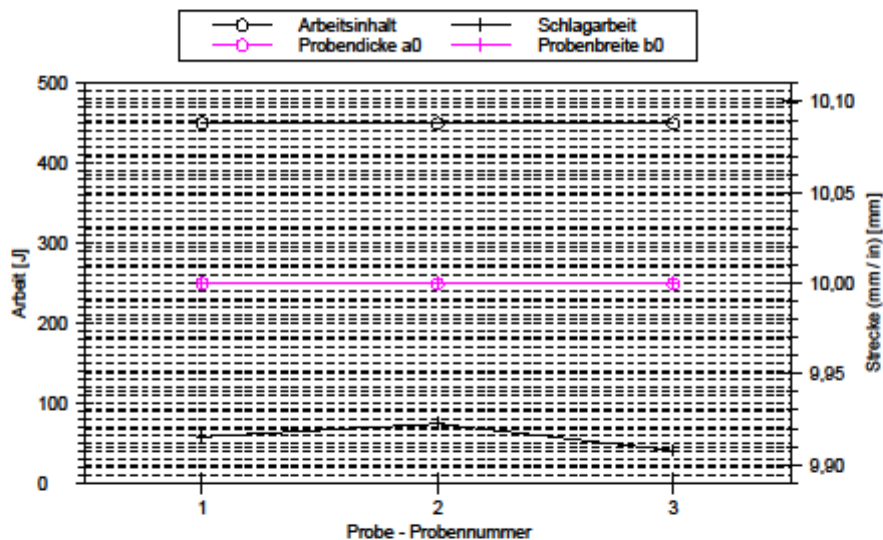


**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SL+5mm
Probenname	: Probe 5	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	58,09	12,91	Charpy
2	10	10	450,00	74,36	16,53	Charpy
3	10	10	450,00	40,87	9,08	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

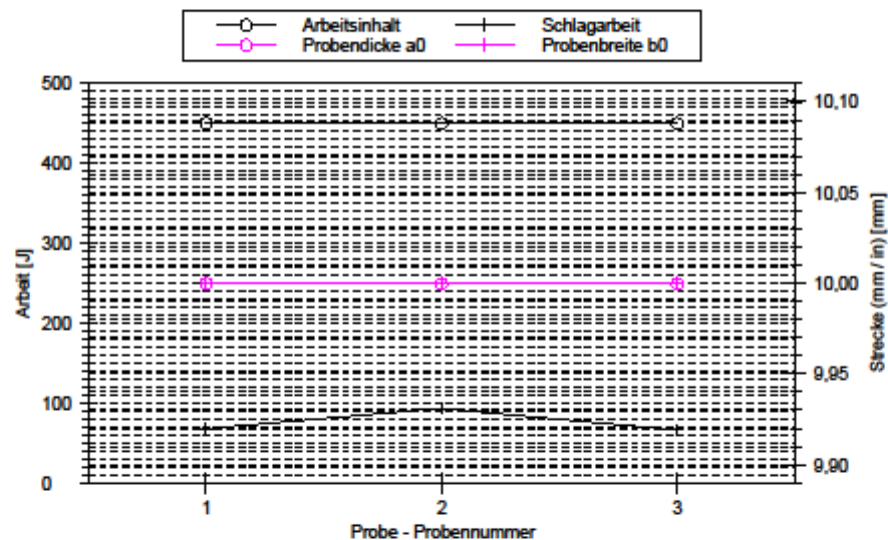
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	57,77	12,84
s	0,000	0	0,00	16,75	3,72
v	0,00	0,00	0,00	28,99	28,99

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SG
Probenname	: Probe 6	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	68,10	15,13	Charpy
2	10	10	450,00	93,61	20,80	Charpy
3	10	10	450,00	66,57	14,79	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

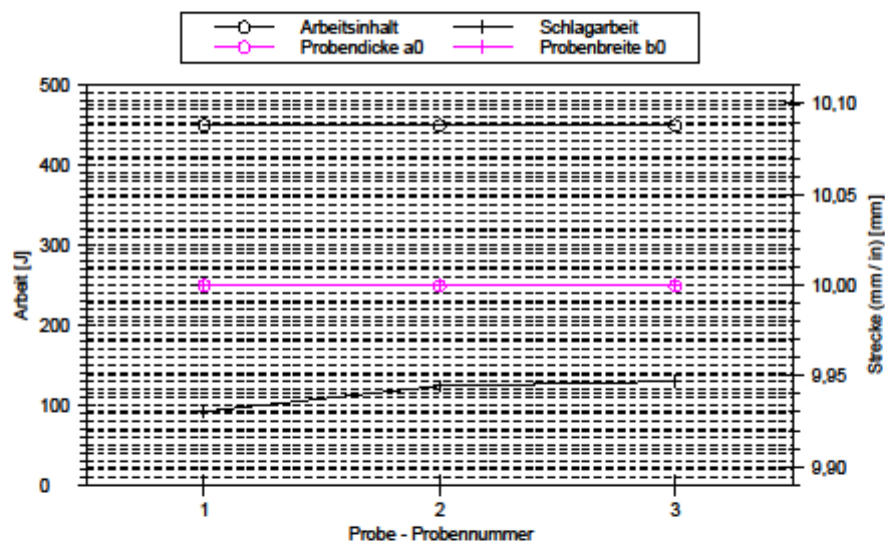
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	76,09	16,91
s	0,000	0	0,00	15,19	3,38
v	0,00	0,00	0,00	19,96	19,96

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SL
Probenname	: Probe 6	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	92,26	20,50	Charpy
2	10	10	450,00	124,03	27,56	Charpy
3	10	10	450,00	129,76	28,83	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

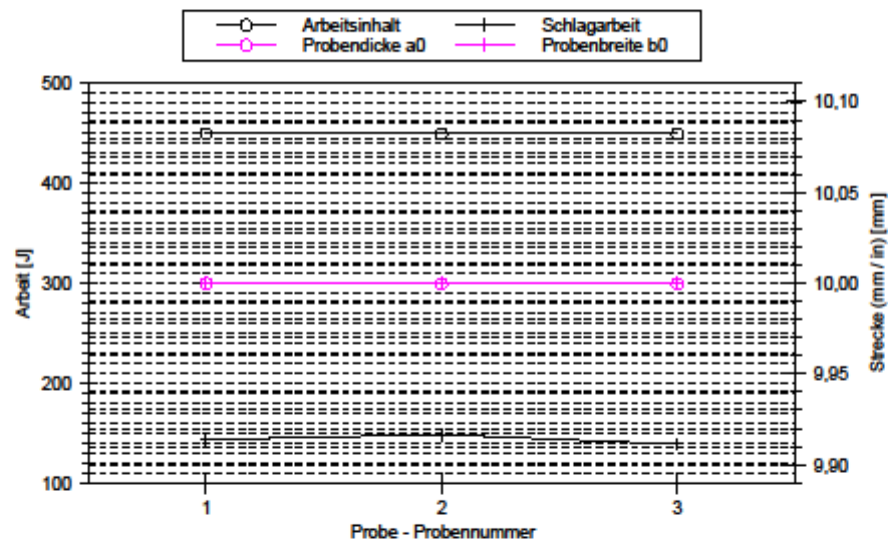
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	115,35	25,63
s	0,000	0	0,00	20,20	4,49
v	0,00	0,00	0,00	17,51	17,51

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SL+2mm
Probenname	: Probe 6	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	143,55	31,90	Charpy
2	10	10	450,00	148,69	33,04	Charpy
3	10	10	450,00	138,82	30,85	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

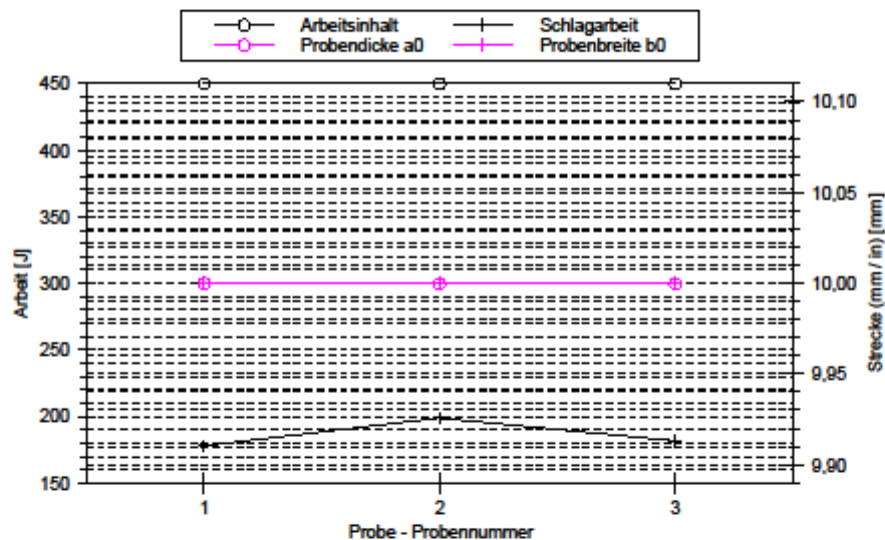
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	143,68	31,93
s	0,000	0	0,00	4,94	1,10
v	0,00	0,00	0,00	3,44	3,44

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SL+5mm
Probenname	: Probe 6	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	177,75	39,50	Charpy
2	10	10	450,00	198,93	44,21	Charpy
3	10	10	450,00	181,54	40,34	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

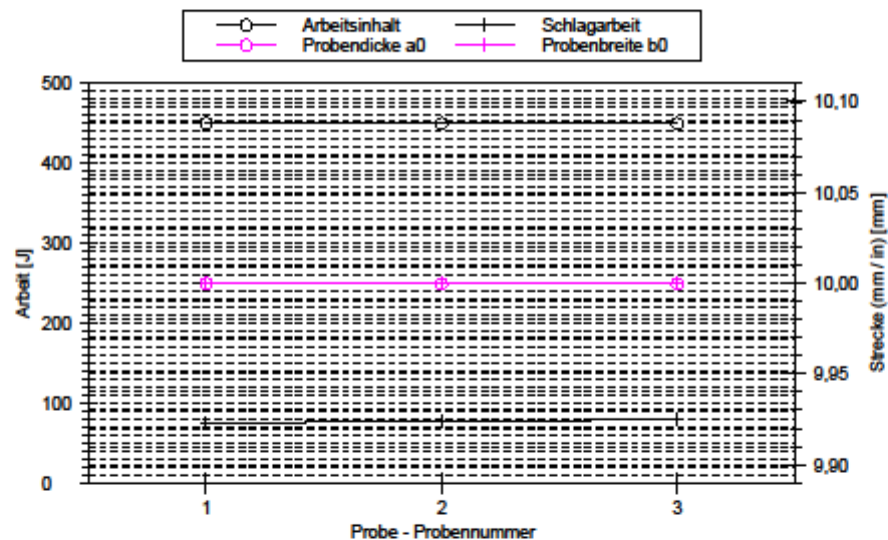
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	188,07	41,35
s	0,000	0	0,00	11,30	2,51
v	0,00	0,00	0,00	6,07	6,07

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SG
Probenname	: Probe 6	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	75,04	16,68	Charpy
2	10	10	450,00	77,56	17,24	Charpy
3	10	10	450,00	79,19	17,80	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

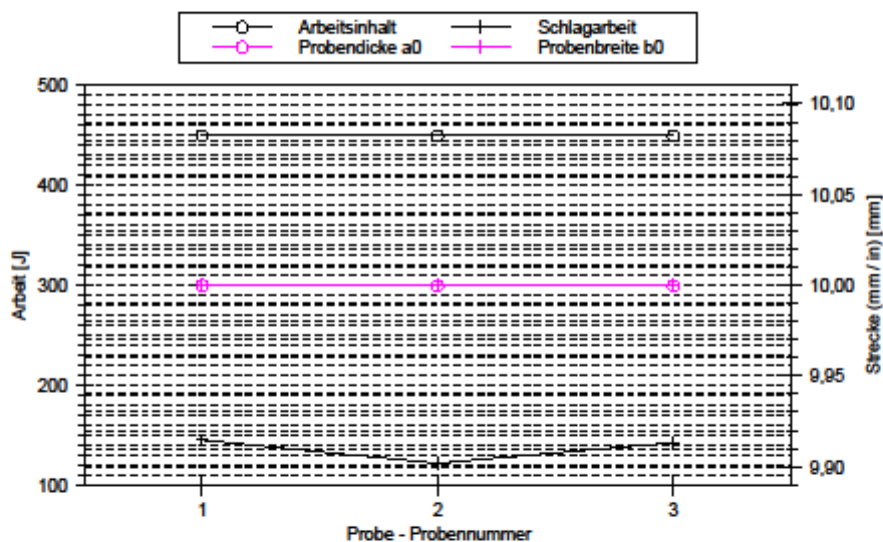
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	77,26	17,17
s	0,000	0	0,00	2,09	0,46
v	0,00	0,00	0,00	2,70	2,70

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980Q
SLV-Kundenr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SL
Probenname	: Probe 6	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	145,40	32,31	Charpy
2	10	10	450,00	121,92	27,09	Charpy
3	10	10	450,00	142,47	31,66	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

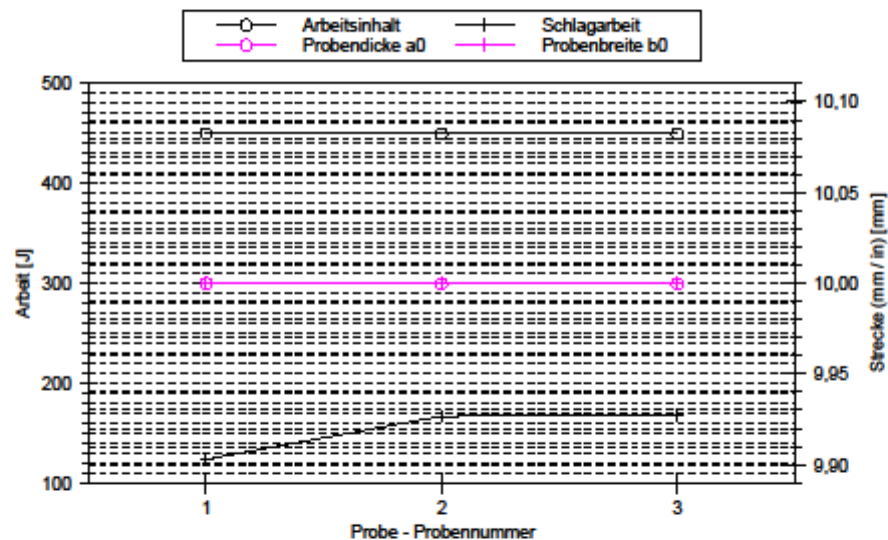
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	138,59	30,35
s	0,000	0	0,00	12,79	2,84
v	0,00	0,00	0,00	9,37	9,37

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SL+2mm
Probenname	: Probe 6	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	123,72	27,49	Charpy
2	10	10	450,00	166,89	37,09	Charpy
3	10	10	450,00	168,38	37,42	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	153,00	34,00
s	0,000	0	0,00	25,37	5,64
v	0,00	0,00	0,00	16,58	16,58

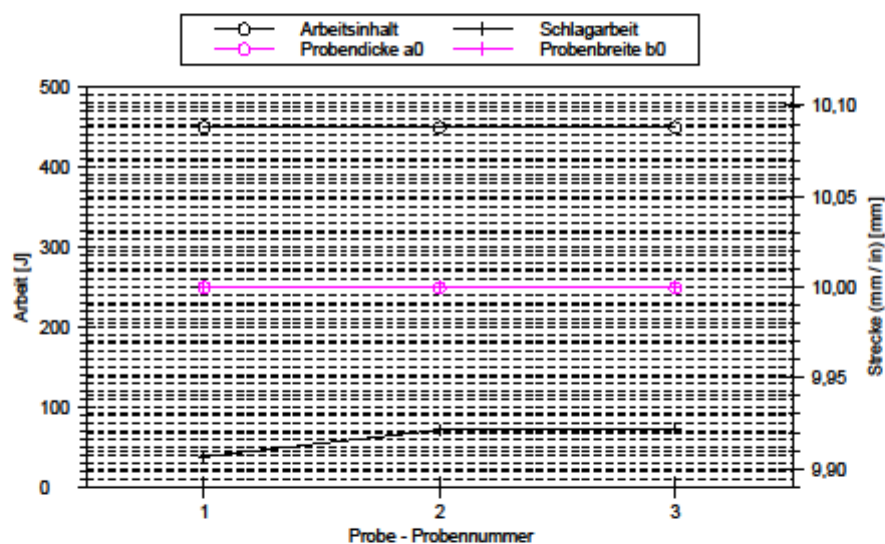


**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960Q
SLV-Kundenr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SL+5mm
Probenname	: Probe 6	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	38,16	8,48	Charpy
2	10	10	450,00	71,52	15,89	Charpy
3	10	10	450,00	73,42	16,32	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

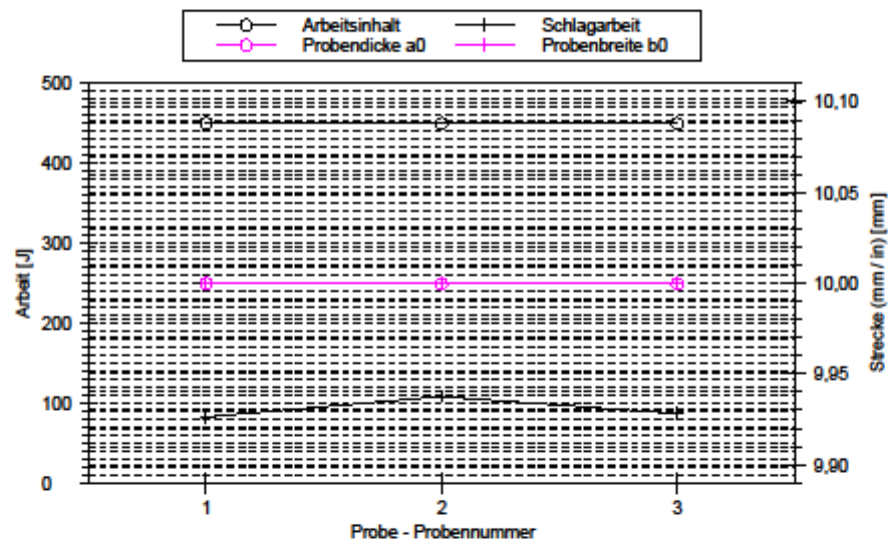
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	61,04	13,56
s	0,000	0	0,00	19,83	4,41
v	0,00	0,00	0,00	32,49	32,49

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SG
Probenname	: Probe 7	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	82,75	18,39	Charpy
2	10	10	450,00	108,26	24,06	Charpy
3	10	10	450,00	87,30	19,40	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

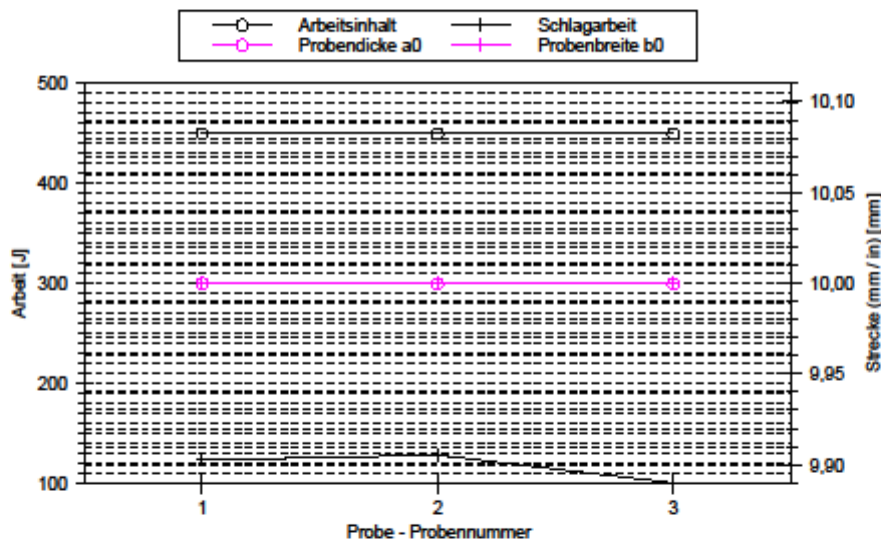
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	92,77	20,62
s	0,000	0	0,00	13,61	3,02
v	0,00	0,00	0,00	14,67	14,67

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SL
Probenname	: Probe 7	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	123,00	27,33	Charpy
2	10	10	450,00	128,00	28,44	Charpy
3	10	10	450,00	100,37	22,30	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

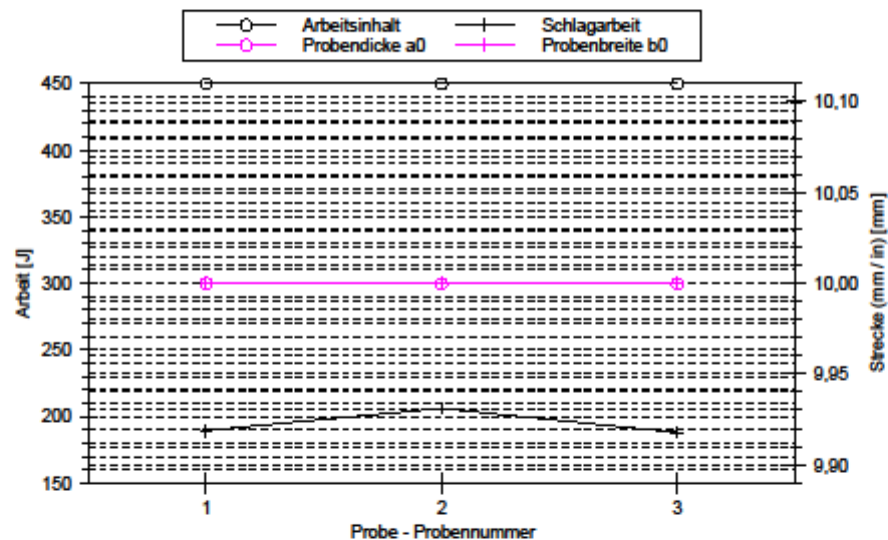
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	117,12	26,03
s	0,000	0	0,00	14,72	3,27
v	0,00	0,00	0,00	12,57	12,57

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SL+2mm
Probenname	: Probe 7	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	189,47	42,10	Charpy
2	10	10	450,00	206,14	45,81	Charpy
3	10	10	450,00	188,34	41,85	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

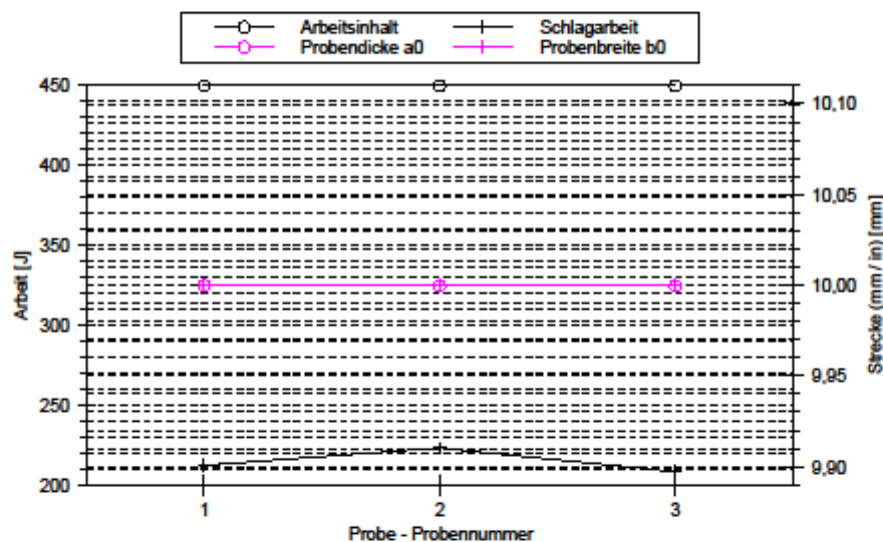
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	194,65	43,26
s	0,000	0	0,00	9,97	2,22
v	0,00	0,00	0,00	5,12	5,12

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980Q
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SL+5mm
Probenname	: Probe 7	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	212,23	47,16	Charpy
2	10	10	450,00	223,22	49,61	Charpy
3	10	10	450,00	208,40	46,31	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

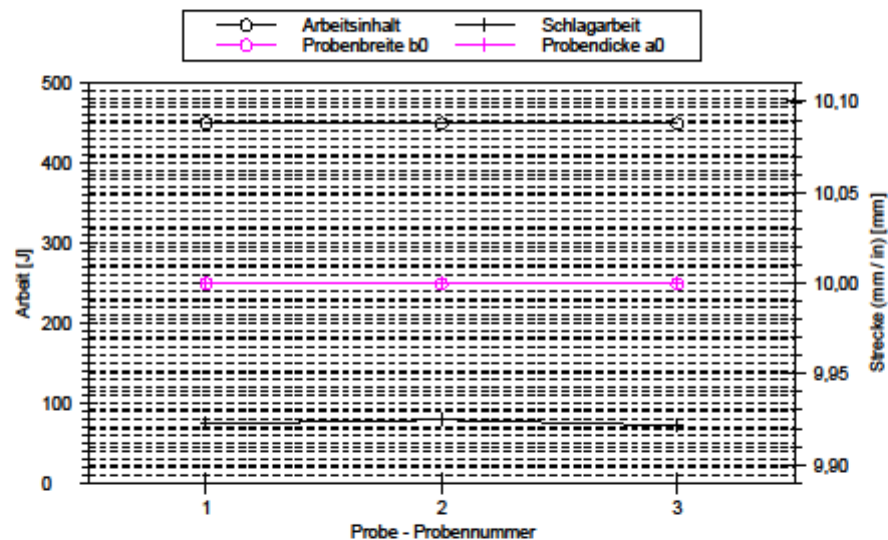
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	214,62	47,69
s	0,000	0	0,00	7,70	1,71
v	0,00	0,00	0,00	3,59	3,59

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960QL
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SG
Probenname	: Probe 7	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	74,36	16,53	Charpy
2	10	10	450,00	79,50	17,67	Charpy
3	10	10	450,00	72,16	16,03	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

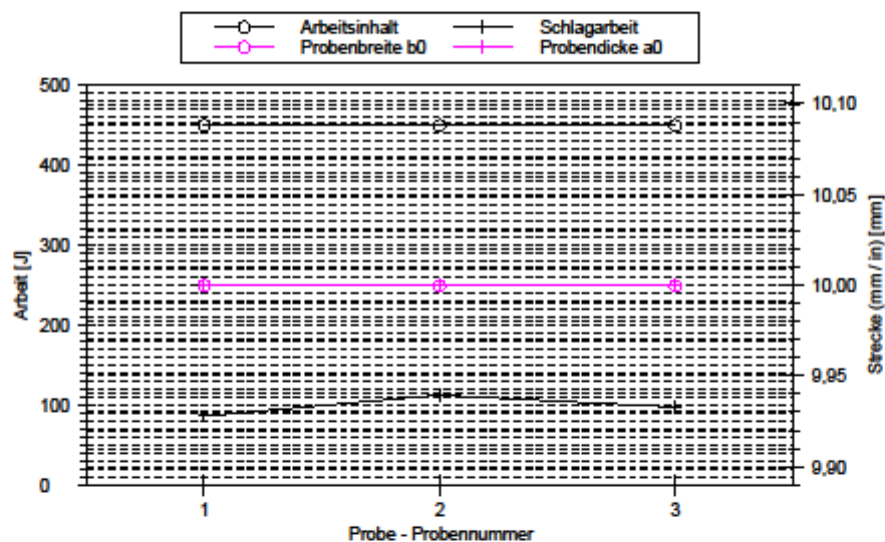
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	75,34	16,74
s	0,000	0	0,00	3,77	0,84
v	0,00	0,00	0,00	5,00	5,00

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980QL
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SL
Probenname	: Probe 7	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	85,99	19,11	Charpy
2	10	10	450,00	112,77	25,06	Charpy
3	10	10	450,00	97,67	21,70	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

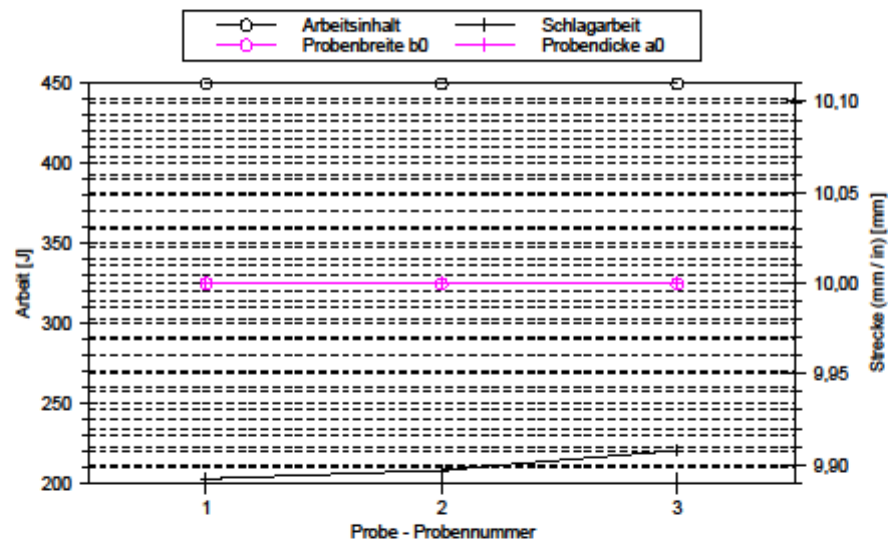
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	98,81	21,98
s	0,000	0	0,00	13,42	2,98
v	0,00	0,00	0,00	13,58	13,58

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980QL
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SL+2mm
Probenname	: Probe 7	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	202,72	45,05	Charpy
2	10	10	450,00	208,04	46,23	Charpy
3	10	10	450,00	220,58	49,01	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	210,44	46,78
s	0,000	0	0,00	9,16	2,04
v	0,00	0,00	0,00	4,35	4,35

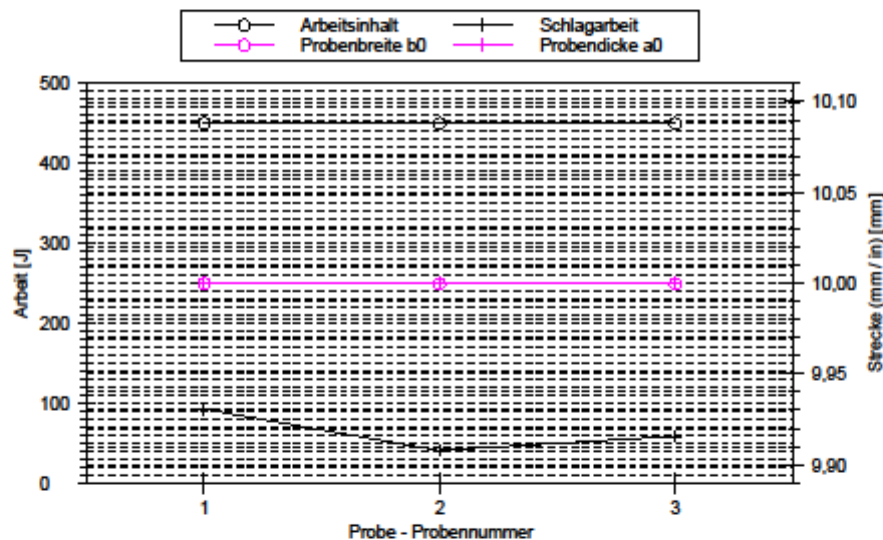


**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960QL
SLV-Kundenr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SL+5mm
Probenname	: Probe 7	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	92,62	20,58	Charpy
2	10	10	450,00	41,14	9,14	Charpy
3	10	10	450,00	58,36	12,97	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

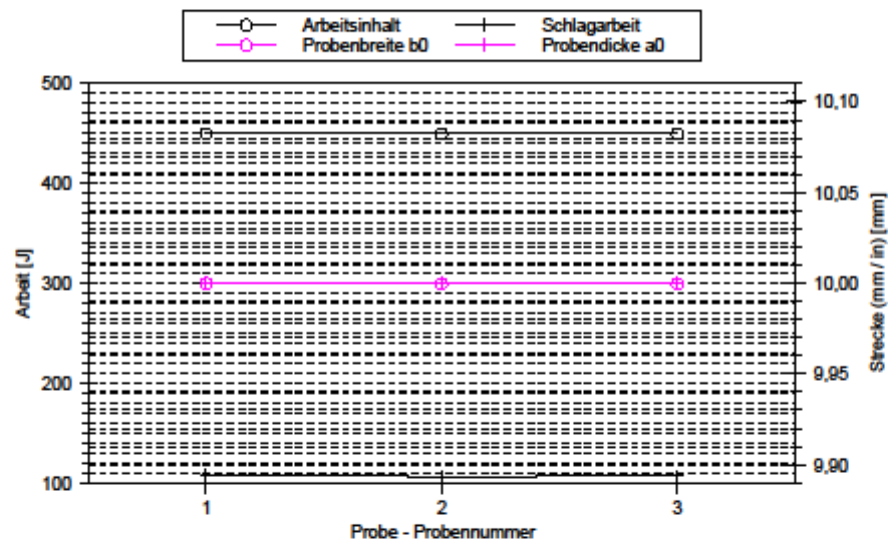
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	64,04	14,23
s	0,000	0	0,00	26,21	5,82
v	0,00	0,00	0,00	40,92	40,92

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980QL
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SG
Probenname	: Probe 8	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	108,26	24,06	Charpy
2	10	10	450,00	106,55	23,68	Charpy
3	10	10	450,00	106,86	23,75	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

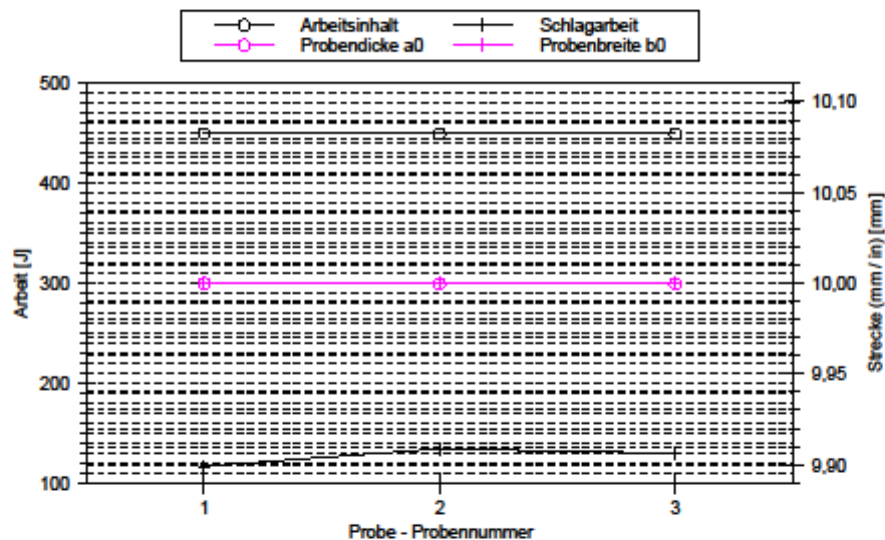
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	107,22	23,83
s	0,000	0	0,00	0,91	0,20
v	0,00	0,00	0,00	0,85	0,85

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960QL
SLV-Kundenr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SL
Probenname	: Probe 8	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	116,96	25,99	Charpy
2	10	10	450,00	134,44	29,88	Charpy
3	10	10	450,00	129,76	28,83	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

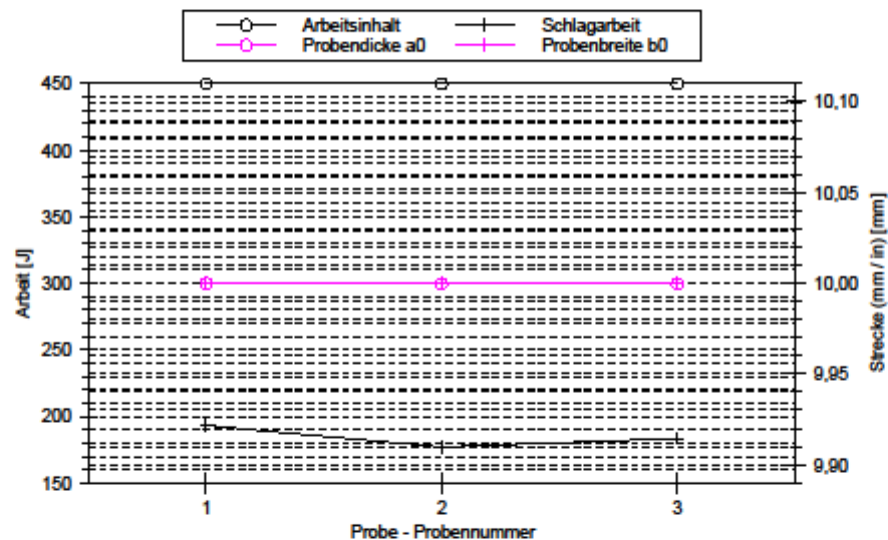
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	127,05	28,23
s	0,000	0	0,00	9,05	2,01
v	0,00	0,00	0,00	7,12	7,12

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980QL
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SL+2mm
Probenname	: Probe 8	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	193,25	42,95	Charpy
2	10	10	450,00	177,03	39,34	Charpy
3	10	10	450,00	183,43	40,76	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

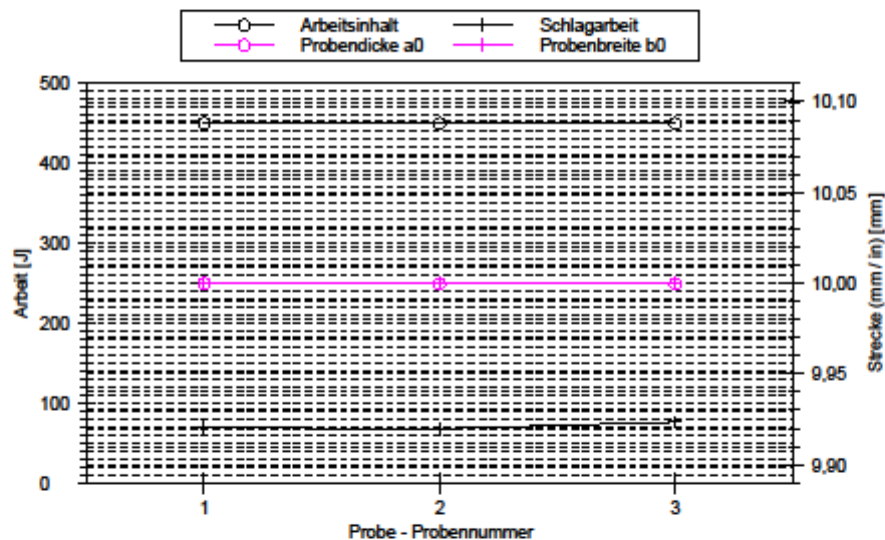
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	184,57	41,02
s	0,000	0	0,00	8,17	1,82
v	0,00	0,00	0,00	4,43	4,43

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980QL
SLV-Kundenr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SL+5mm
Probenname	: Probe 8	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	69,36	15,41	Charpy
2	10	10	450,00	67,51	15,00	Charpy
3	10	10	450,00	76,62	17,03	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

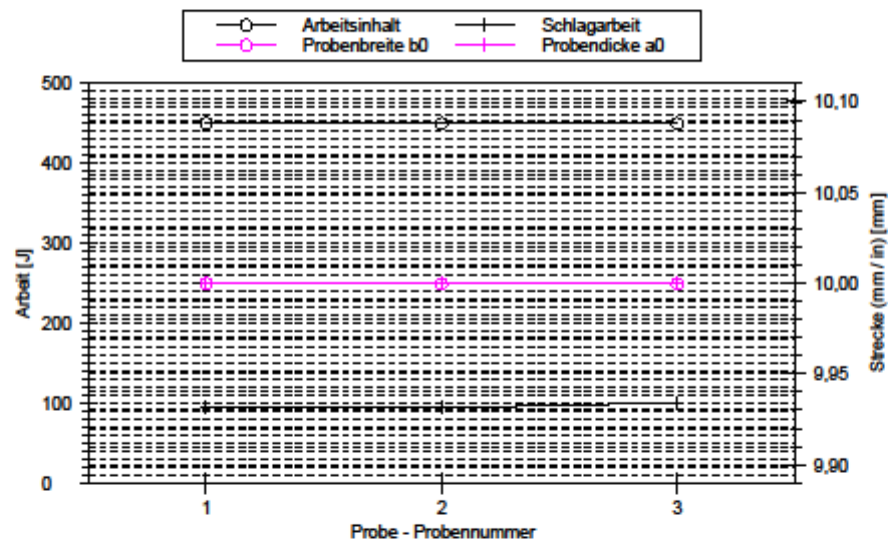
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	71,16	15,81
s	0,000	0	0,00	4,81	1,07
v	0,00	0,00	0,00	6,76	6,76

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960QL
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SG
Probenname	: Probe 8	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	95,64	21,25	Charpy
2	10	10	450,00	93,93	20,87	Charpy
3	10	10	450,00	100,69	22,38	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

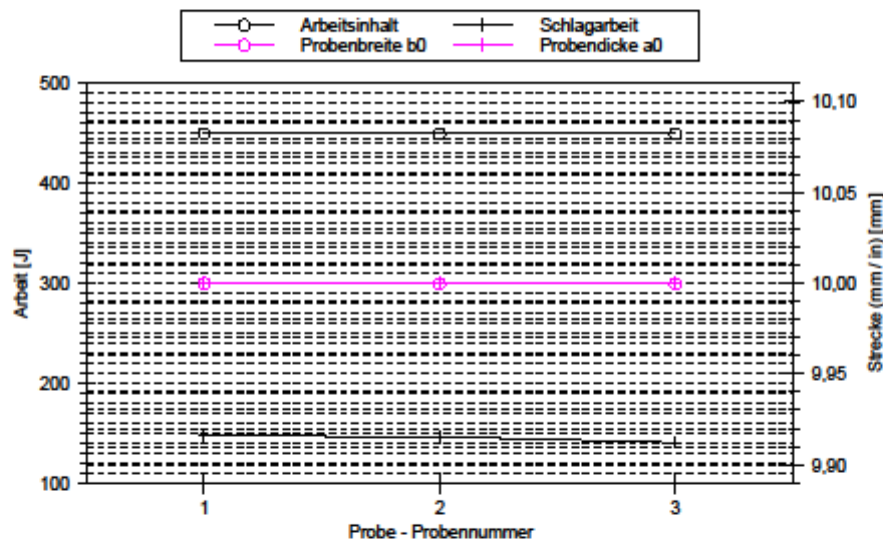
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	96,75	21,50
s	0,000	0	0,00	3,51	0,78
v	0,00	0,00	0,00	3,63	3,63

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980QL
SLV-Kundenr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SL
Probenname	: Probe 8	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	147,24	32,72	Charpy
2	10	10	450,00	146,48	32,55	Charpy
3	10	10	450,00	140,62	31,25	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

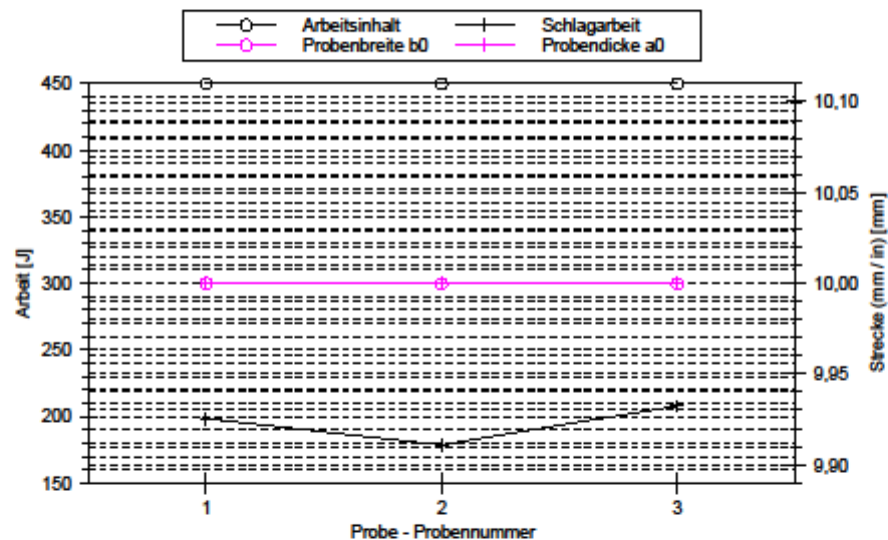
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	144,78	32,17
s	0,000	0	0,00	3,62	0,81
v	0,00	0,00	0,00	2,50	2,50

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960QL
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SL+2mm
Probenname	: Probe 8	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	198,57	44,13	Charpy
2	10	10	450,00	178,88	39,75	Charpy
3	10	10	450,00	207,68	46,15	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	195,04	43,34
s	0,000	0	0,00	14,72	3,27
v	0,00	0,00	0,00	7,55	7,55

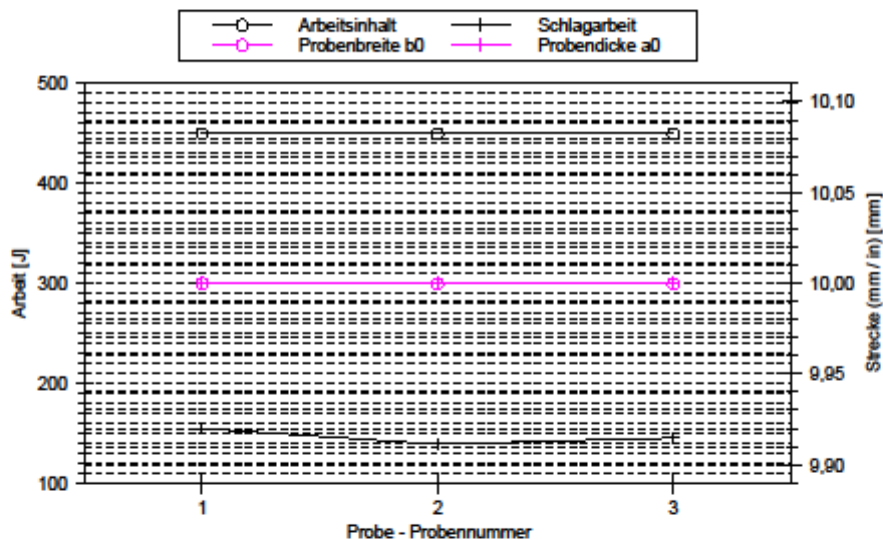


**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960QL
SLV-Kundenr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SL+5mm
Probenname	: Probe 8	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	154,59	34,35	Charpy
2	10	10	450,00	139,18	30,93	Charpy
3	10	10	450,00	145,40	32,31	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

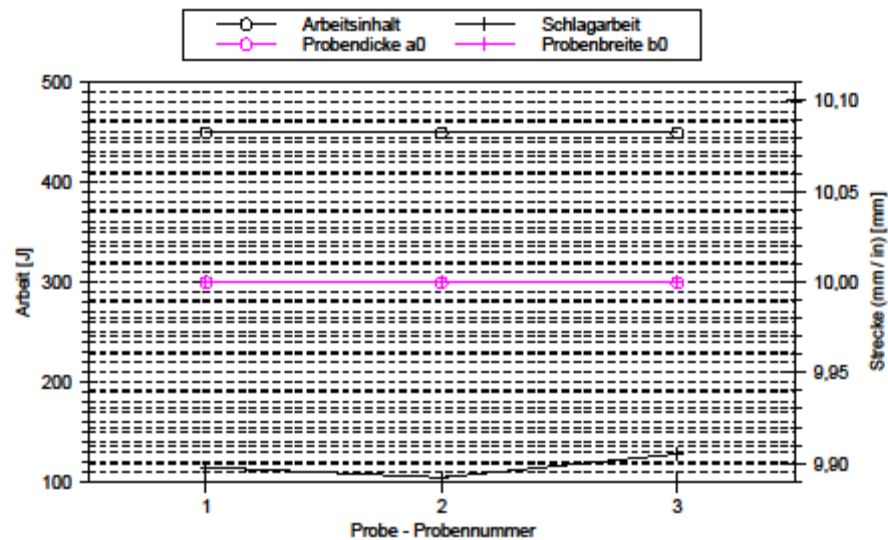
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	146,39	32,53
s	0,000	0	0,00	7,75	1,72
v	0,00	0,00	0,00	5,30	5,30

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980QL
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SG
Probenname	: Probe 9	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	114,52	25,45	Charpy
2	10	10	450,00	104,11	23,14	Charpy
3	10	10	450,00	127,28	28,28	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

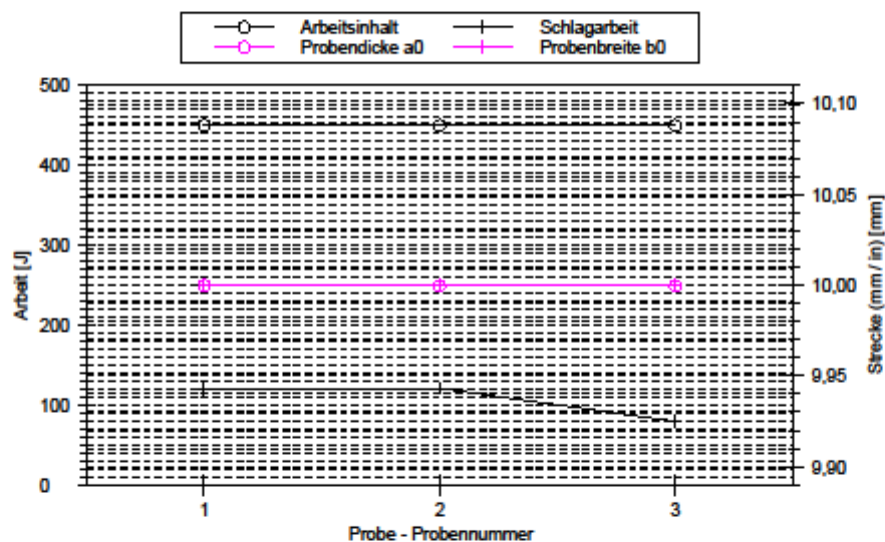
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
$\bar{x}$	10	10	450,00	115,31	25,62
s	0,000	0	0,00	11,60	2,58
v	0,00	0,00	0,00	10,06	10,06

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960QL
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SL
Probenname	: Probe 9	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	120,52	26,78	Charpy
2	10	10	450,00	121,19	26,93	Charpy
3	10	10	450,00	80,13	17,81	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

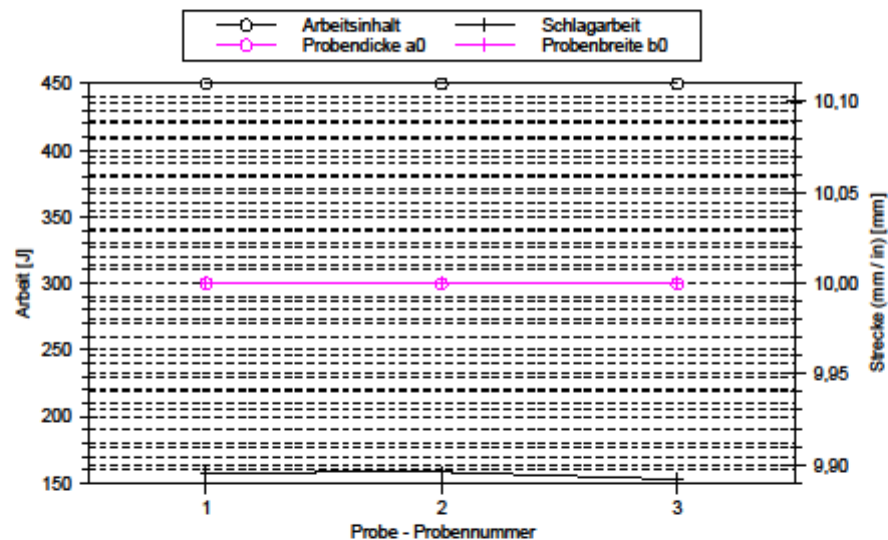
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	107,28	23,84
s	0,000	0	0,00	23,51	5,23
v	0,00	0,00	0,00	21,92	21,92

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980QL
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SL+2mm
Probenname	: Probe 9	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	157,92	35,09	Charpy
2	10	10	450,00	158,33	35,18	Charpy
3	10	10	450,00	152,74	33,94	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

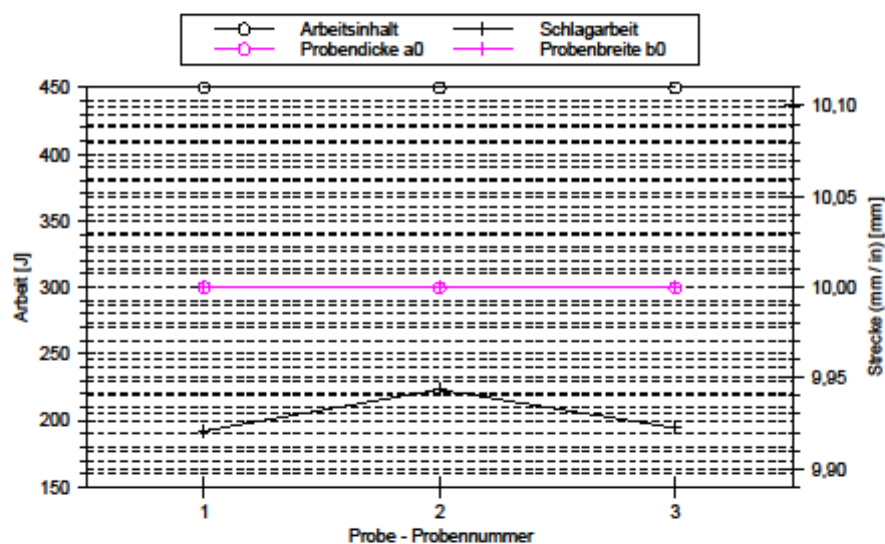
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	156,33	34,74
s	0,000	0	0,00	3,12	0,69
v	0,00	0,00	0,00	1,99	1,99

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980QL
SLV-Kundenr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SL+5mm
Probenname	: Probe 9	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	192,13	42,70	Charpy
2	10	10	450,00	223,22	49,61	Charpy
3	10	10	450,00	194,38	43,20	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

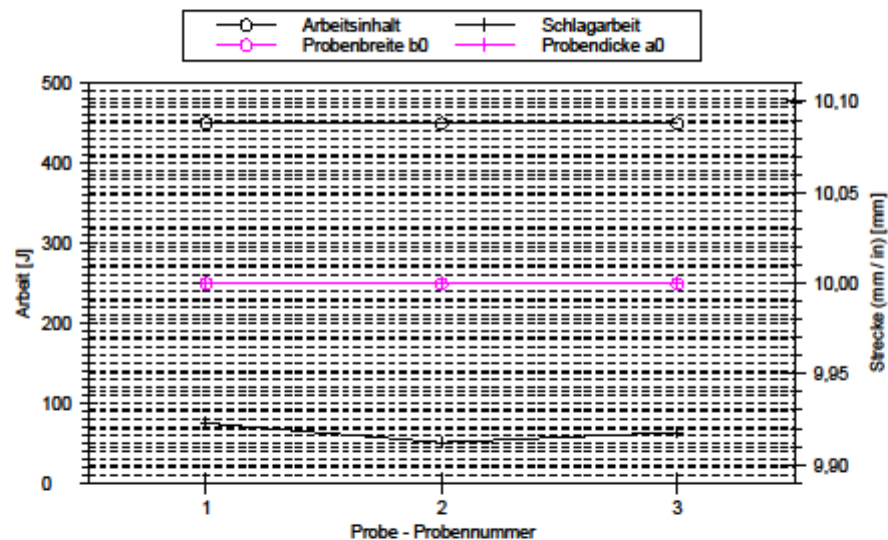
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	203,24	45,17
s	0,000	0	0,00	17,34	3,85
v	0,00	0,00	0,00	8,53	8,53

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960QL
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SG
Probenname	: Probe 9	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	75,04	16,68	Charpy
2	10	10	450,00	50,74	11,28	Charpy
3	10	10	450,00	63,50	14,11	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

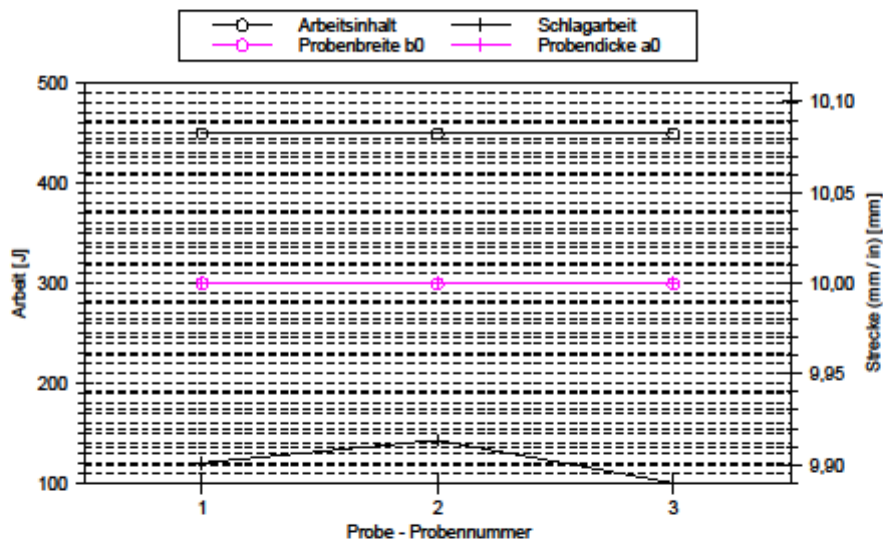
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	63,09	14,02
s	0,000	0	0,00	12,15	2,70
v	0,00	0,00	0,00	19,26	19,26

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980QL
SLV-Kundenr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SL
Probenname	: Probe 9	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	120,16	26,70	Charpy
2	10	10	450,00	142,83	31,74	Charpy
3	10	10	450,00	100,37	22,30	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

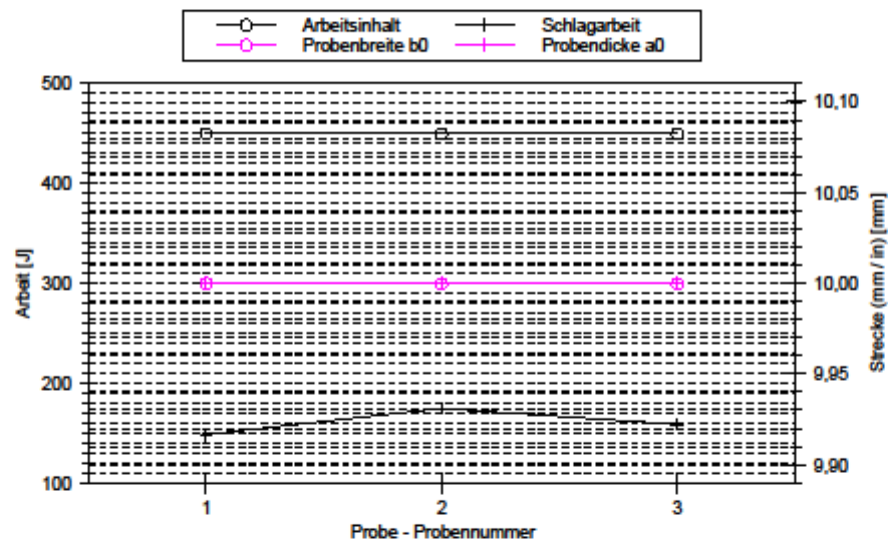
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	121,12	26,92
s	0,000	0	0,00	21,24	4,72
v	0,00	0,00	0,00	17,54	17,54

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960QL
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SL+2mm
Probenname	: Probe 9	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	148,69	33,04	Charpy
2	10	10	450,00	174,78	38,84	Charpy
3	10	10	450,00	158,69	35,26	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	160,72	35,72
s	0,000	0	0,00	13,16	2,93
v	0,00	0,00	0,00	8,19	8,19

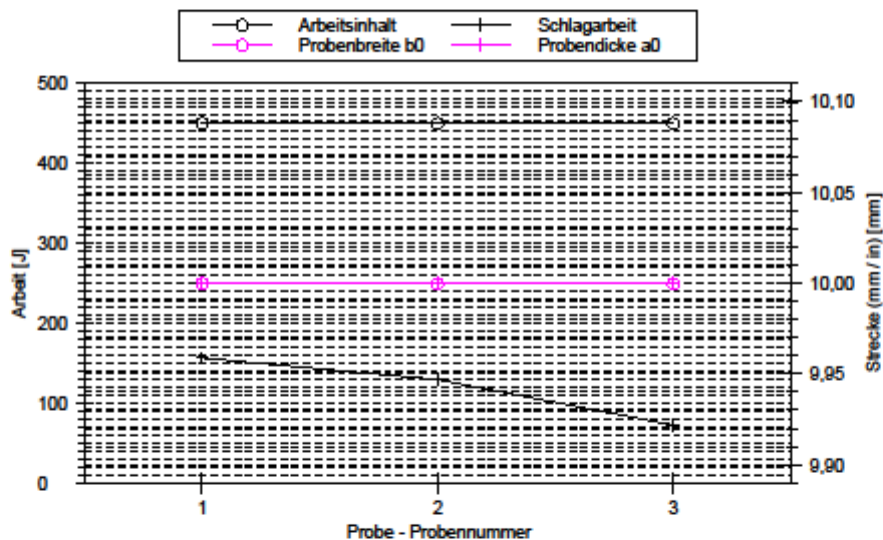


**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960QL
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SL+5mm
Probenname	: Probe 9	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	156,44	34,76	Charpy
2	10	10	450,00	129,76	28,83	Charpy
3	10	10	450,00	72,79	16,17	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

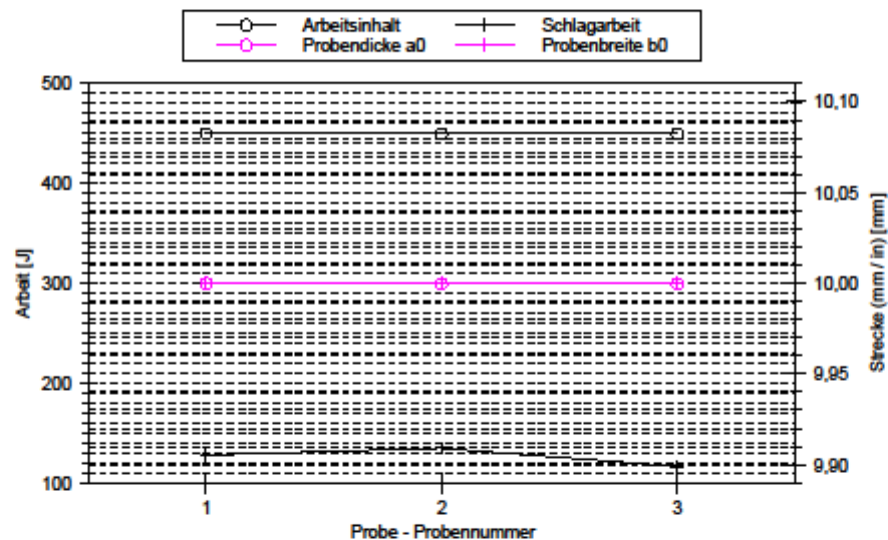
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	119,66	26,59
s	0,000	0	0,00	42,73	9,50
v	0,00	0,00	0,00	35,71	35,71

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980QL
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SG
Probenname	: Probe 10	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	128,00	28,44	Charpy
2	10	10	450,00	134,81	29,96	Charpy
3	10	10	450,00	116,96	25,99	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

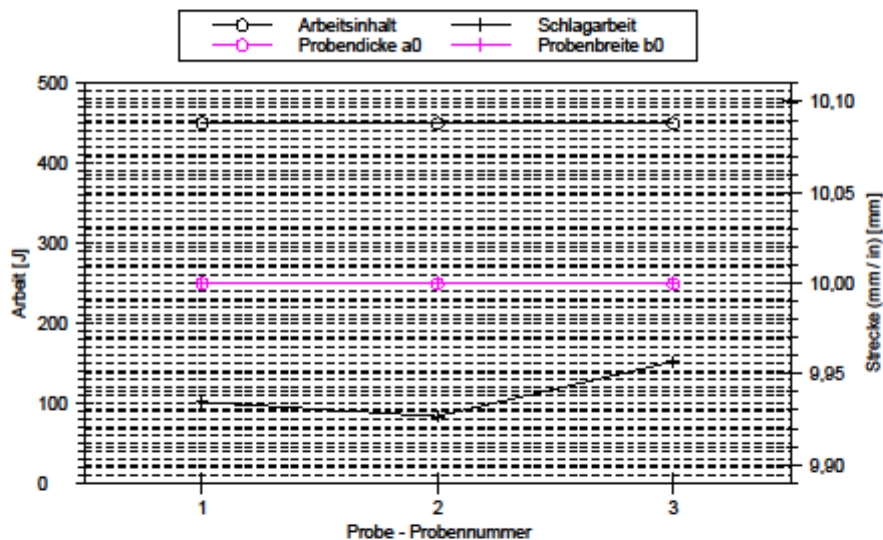
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	126,59	28,13
s	0,000	0	0,00	9,01	2,00
v	0,00	0,00	0,00	7,12	7,12

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960QL
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SL
Probenname	: Probe 10	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	101,05	22,46	Charpy
2	10	10	450,00	83,38	18,53	Charpy
3	10	10	450,00	151,66	33,70	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

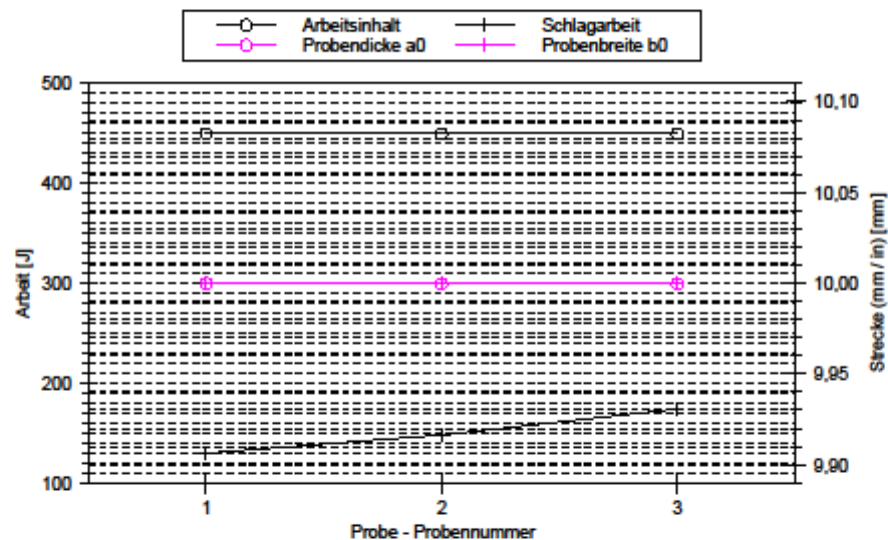
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	112,03	24,90
s	0,000	0	0,00	35,44	7,88
v	0,00	0,00	0,00	31,63	31,63

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980QL
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SL+2mm
Probenname	: Probe 10	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	129,76	28,83	Charpy
2	10	10	450,00	147,96	32,88	Charpy
3	10	10	450,00	174,01	38,67	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

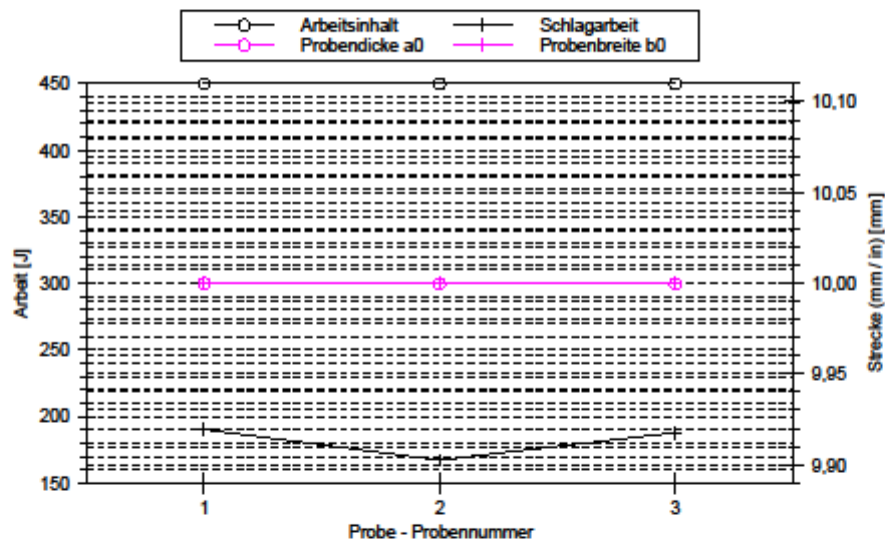
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	150,58	33,46
s	0,000	0	0,00	22,24	4,94
v	0,00	0,00	0,00	14,77	14,77

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980QL
SLV-Kundenr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Decklage / -40°C / SL+5mm
Probenname	: Probe 10	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	190,24	42,27	Charpy
2	10	10	450,00	167,25	37,17	Charpy
3	10	10	450,00	187,58	41,68	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

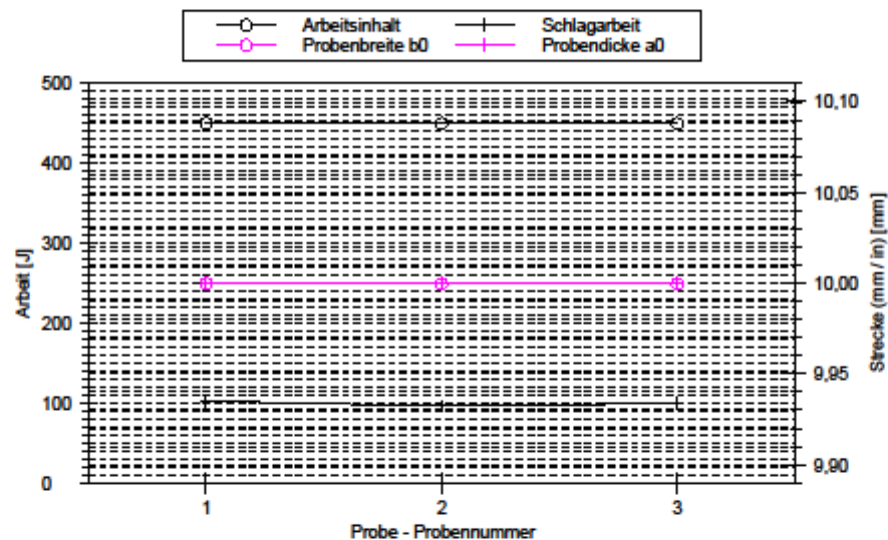
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	181,69	40,38
s	0,000	0	0,00	12,57	2,79
v	0,00	0,00	0,00	6,92	6,92

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960QL
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SG
Probenname	: Probe 10	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	102,40	22,76	Charpy
2	10	10	450,00	95,96	21,32	Charpy
3	10	10	450,00	100,01	22,22	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

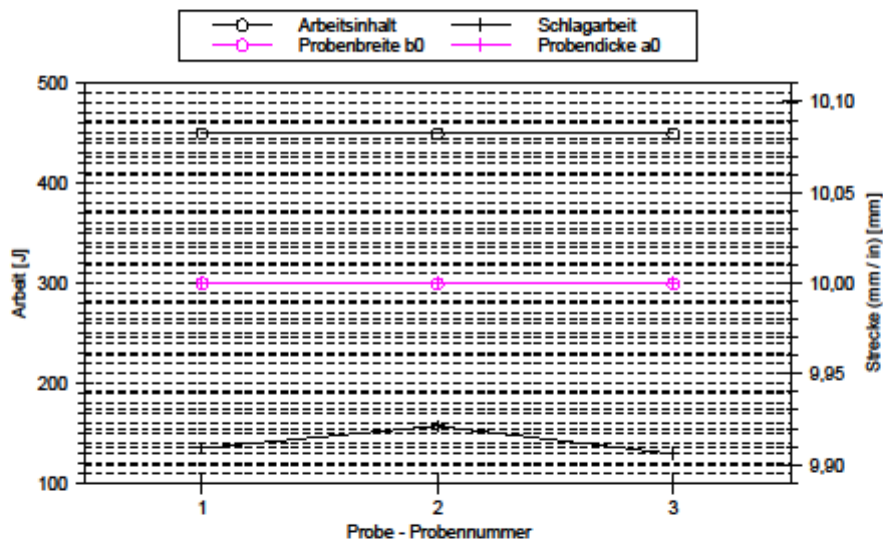
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	99,46	22,10
s	0,000	0	0,00	3,26	0,72
v	0,00	0,00	0,00	3,28	3,28

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S980QL
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SL
Probenname	: Probe 10	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	134,81	29,96	Charpy
2	10	10	450,00	157,20	34,93	Charpy
3	10	10	450,00	129,40	28,75	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

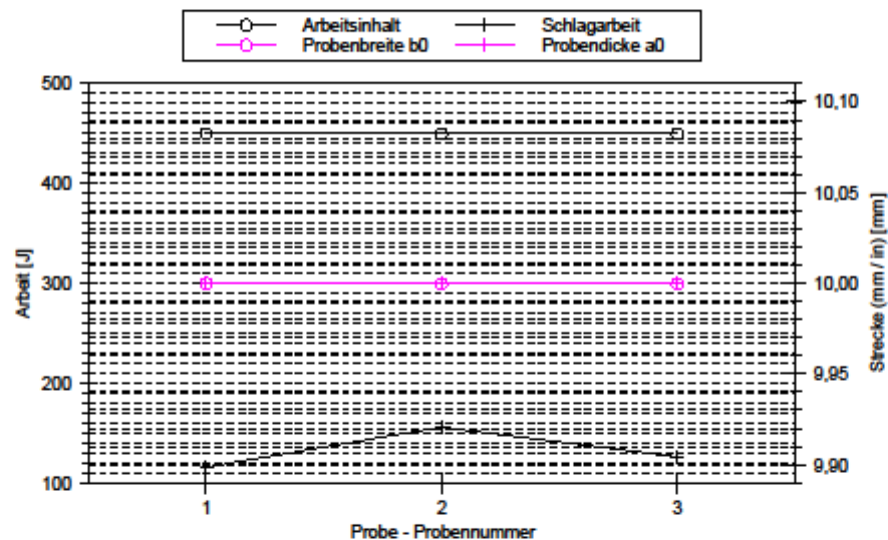
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	140,47	31,22
s	0,000	0	0,00	14,74	3,28
v	0,00	0,00	0,00	10,50	10,50

**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960QL
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SL+2mm
Probenname	: Probe 10	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	115,58	25,68	Charpy
2	10	10	450,00	156,08	34,68	Charpy
3	10	10	450,00	126,20	28,04	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	132,61	29,47
s	0,000	0	0,00	21,01	4,67
v	0,00	0,00	0,00	15,84	15,84

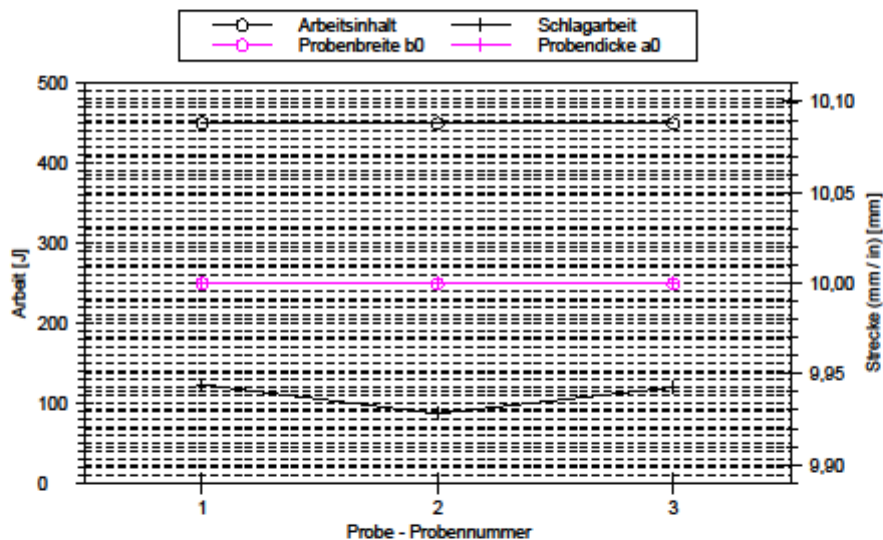


**Parametertabelle:**

Kunde	: FuE	Material	: S960QL
SLV-Kundennr.	: 255-806-10-012	Probenmaße	: 10 x 10 x 55
SLV-Auftragsnr.	: 0365/16	Prüfbedingungen	: Mitte / -40°C / SL+5mm
Probenname	: Probe 10	Prüfer	: Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10	450,00	123,36	27,41	Charpy
2	10	10	450,00	86,67	19,26	Charpy
3	10	10	450,00	119,44	26,54	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10	450,00	109,82	24,40
s	0,000	0	0,00	20,15	4,48
v	0,00	0,00	0,00	18,34	18,34

---

***Protokolle der Zugversuche***

**Parametertabelle:**

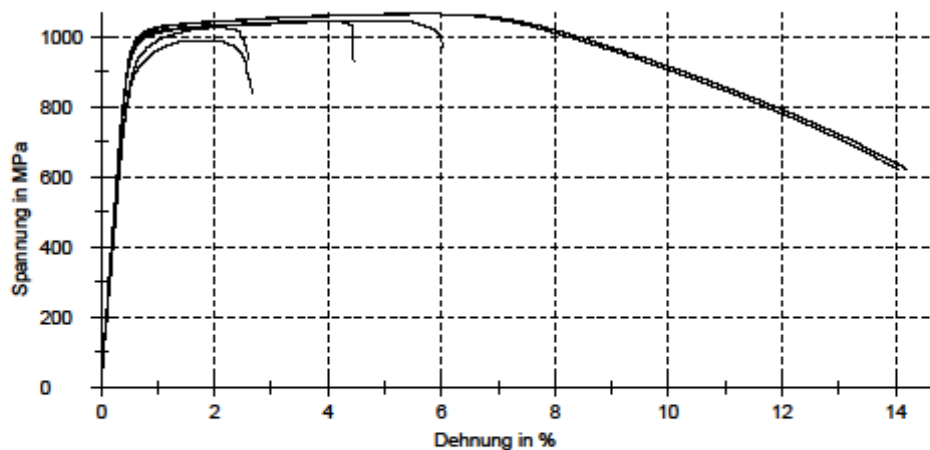
Auftraggeber	: FuE - Liebherr	Prüfer	: Buder
SLV-Kundennr.	: Diplomprojekt Tietböhl	Prüfdatum	: 01.09.2016
SLV-Auftragsnr.	: RUN 1	Bemerkung	: Bruchlage:
Probennr.	: Stumpfnah / UP / PA / beidseitig		Z1.1 - SG
Werkstoff	: S960QL / 50mm		Z1.2 - SG
			Z1.3 - GW
			Z2.1 - SG
			Z2.2 - SG
			Z2.3 - GW

**Ergebnisse:**

Nr	Probenkennz.	Probindicke a0 mm	Probenbreite b0 mm	S0 mm <sup>2</sup>	Rp 0,2 MPa	ReH MPa	Rm MPa	Fmax kN
1	Z1.1	20,0	20,0	400,0	947	-	1026	410,205
2	Z1.2	20,0	20,0	400,0	979	-	1047	418,640
3	Z1.3	20,0	20,0	400,0	990	-	1065	426,133
4	Z2.1	19,9	20,0	398,0	918	-	990	394,087
5	Z2.2	19,8	20,0	396,0	990	-	1045	413,647
6	Z2.3	20,0	20,0	400,0	1008	-	1066	426,396

**Statistik:**

Serie n = 6	Probenbreite b0 mm	Probindicke a0 mm	S0 mm <sup>2</sup>	Rp 0,2 MPa	ReH MPa	Rm MPa	Fmax kN
x	20,0	19,9	399,0	972	-	1040	414,851
s	0,0	0,1	1,7	33	-	29	12,076
v	0,00	0,42	0,42	3,41	-	2,75	2,91



**Parametertabelle:**

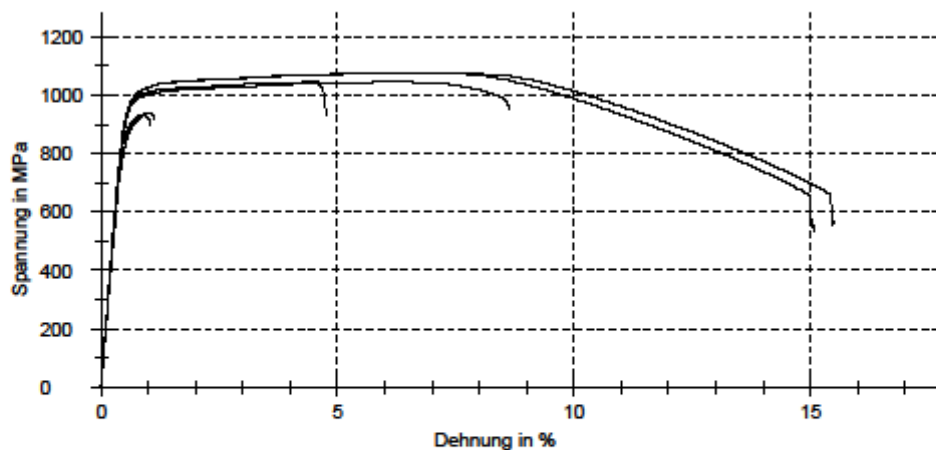
Auftraggeber	: FuE - Liebherr	Prüfer	: Buder
SLV-Kundenr.	: Diplomprojekt Tietböhl	Prüfdatum	: 01.09.2016
SLV-Auftragsnr.	: RUN 2	Bemerkung	: Bruchlage:
Probenr.	: Stumpfnah / UP / PA / beidseitig		Z1.1 - SG
Werkstoff	: S960QL / 50mm		Z1.2 - SG
			Z1.3 - GW
			Z2.1 - SG
			Z2.2 - SG
			Z2.3 - GW

**Ergebnisse:**

Nr	Probenkennz.	Probendicke a0 mm	Probenbreite b0 mm	S0 mm <sup>2</sup>	Rp 0,2 MPa	ReH MPa	Rm MPa	Fmax kN
1	Z1.1	19,8	20,0	396,0	886	-	939	371,774
2	Z1.2	19,9	20,0	398,0	977	-	1045	415,997
3	Z1.3	19,7	20,0	394,0	994	-	1076	423,772
4	Z2.1	19,8	20,0	396,0	902	-	933	369,399
5	Z2.2	19,8	20,0	396,0	986	-	1045	413,965
6	Z2.3	19,7	20,0	394,0	991	-	1077	424,165

**Statistik:**

Serie n = 6	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	S0 mm <sup>2</sup>	Rp 0,2 MPa	ReH MPa	Rm MPa	Fmax kN
x	20,0	19,8	395,7	956	-	1019	403,179
s	0,0	0,1	1,5	49	-	66	25,583
v	0,00	0,38	0,38	5,08	-	6,47	6,35



**Parametertabelle:**

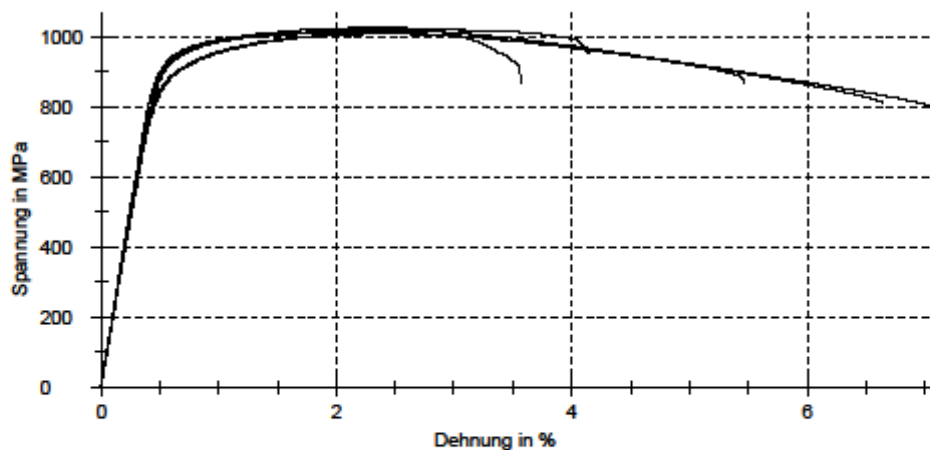
Auftraggeber	: FuE - Liebherr	Prüfer	: Buder
SLV-Kundenr.	: Diplomprojekt Tietböhl	Prüfdatum	: 01.09.2018
SLV-Auftragsnr.	: RUN 3	Bemerkung	: Bruchlage:
Probenr.	: Stumpfnah / UP / PA / beidseitig		Z1.1 - SG
Werkstoff	: S960QL / 50mm		Z1.2 - SG
			Z1.3 - SG
			Z2.1 - SG
			Z2.2 - SG
			Z2.3 - SG

**Ergebnisse:**

Nr	Probenkennz.	Probindicke a0 mm	Probenbreite b0 mm	S0 mm <sup>2</sup>	Rp 0,2 MPa	ReH MPa	Rm MPa	Fmax kN
1	Z1.1	19,7	20,0	394,0	948	-	1019	401,598
2	Z1.2	19,8	20,0	396,0	960	-	1019	403,571
3	Z1.3	19,7	20,0	394,0	901	-	1010	397,756
4	Z2.1	19,8	20,0	396,0	948	-	1028	406,146
5	Z2.2	19,8	20,0	396,0	958	-	1018	403,237
6	Z2.3	19,7	20,0	394,0	901	-	1008	396,983

**Statistik:**

Serie n = 6	Probenbreite b0 mm	Probindicke a0 mm	S0 mm <sup>2</sup>	Rp 0,2 MPa	ReH MPa	Rm MPa	Fmax kN
x	20,0	19,8	395,0	936	-	1017	401,548
s	0,0	0,1	1,1	27	-	7	3,558
v	0,00	0,28	0,28	2,92	-	0,67	0,89



**Parametertabelle:**

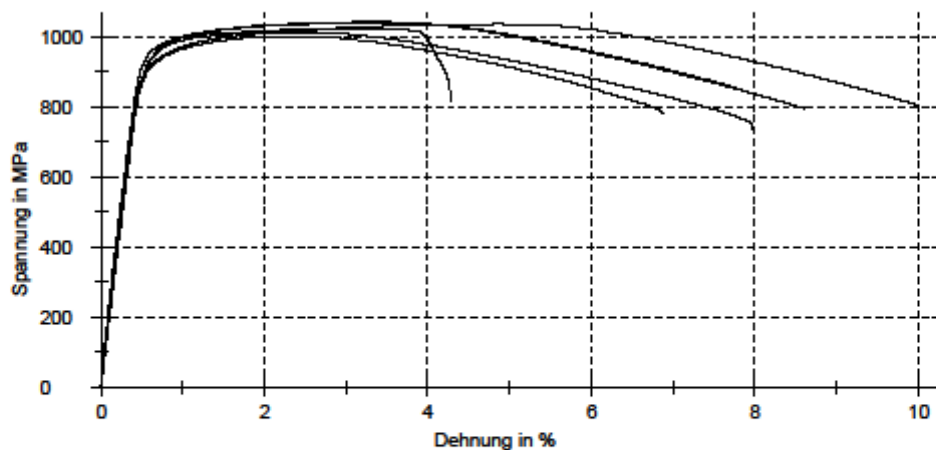
Auftraggeber	: FuE - Liebherr	Prüfer	: Buder
SLV-Kundenr.	: Diplomprojekt Tietböhl	Prüfdatum	: 01.09.2016
SLV-Auftragsnr.	: RUN 4	Bemerkung	: Bruchlage:
Probenr.	: Stumpfnah / UP / PA / beidseitig		Z1.1 - SG
Werkstoff	: S960QL / 50mm		Z1.2 - SG
			Z1.3 - SG
			Z2.1 - SG
			Z2.2 - SG
			Z2.3 - SG

**Ergebnisse:**

Nr	Probenkennz.	Probendicke a0 mm	Probenbreite b0 mm	S0 mm <sup>2</sup>	Rp 0,2 MPa	ReH MPa	Rm MPa	Fmax kN
1	Z1.1	19,7	20,0	394,0	919	-	1002	394,669
2	Z1.2	19,8	20,0	396,0	959	-	1022	404,788
3	Z1.3	19,7	20,0	394,0	957	-	1041	410,242
4	Z2.1	19,7	20,0	394,0	930	-	1012	398,750
5	Z2.2	19,7	20,0	394,0	971	-	1036	408,156
6	Z2.3	19,7	20,0	394,0	949	-	1040	409,747

**Statistik:**

Serie n = 6	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	S0 mm <sup>2</sup>	Rp 0,2 MPa	ReH MPa	Rm MPa	Fmax kN
x	20,0	19,7	394,3	948	-	1026	404,392
s	0,0	0,0	0,8	20	-	16	6,381
v	0,00	0,21	0,21	2,06	-	1,59	1,58



**Parametertabelle:**

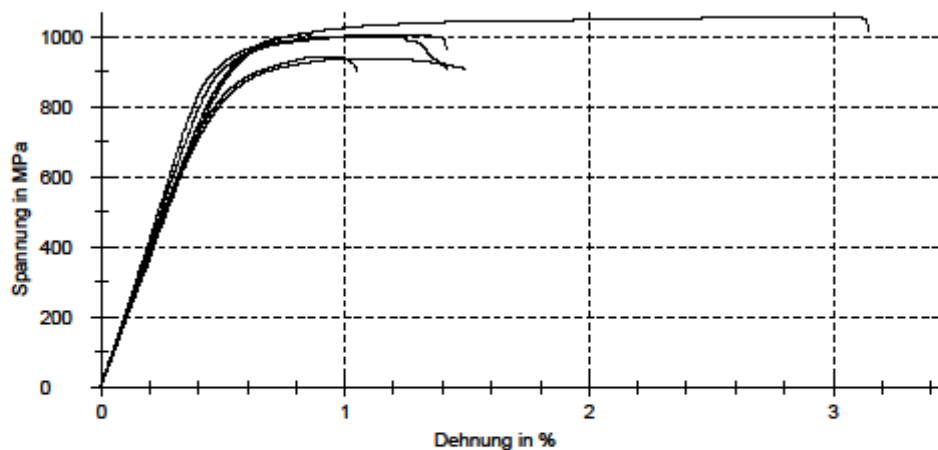
Auftraggeber	: FuE - Liebherr	Prüfer	: Buder
SLV-Kundennr.	: Diplomprojekt Tietböhl	Prüfdatum	: 01.09.2016
SLV-Auftragsnr.	: RUN 5	Bemerkung	: Bruchlage:
Probennr.	: Stumpfnah / UP / PA / beidseitig		Z1.1 - SG
Werkstoff	: S960QL / 50mm		Z1.2 - SG
			Z1.3 - SG
			Z2.1 - SG
			Z2.2 - SG
			Z2.3 - SG

**Ergebnisse:**

Nr	Probenkennz.	Probindicke a0 mm	Probenbreite b0 mm	S0 mm <sup>2</sup>	Rp 0,2 MPa	ReH MPa	Rm MPa	Fmax kN
1	Z1.1	19,7	20,0	394,0	904	-	945	372,214
2	Z1.2	19,8	20,0	396,0	972	-	1001	396,562
3	Z1.3	19,8	20,0	396,0	994	-	1007	398,925
4	Z2.1	19,8	20,0	396,0	899	-	934	370,054
5	Z2.2	19,7	20,0	394,0	977	-	1005	396,034
6	Z2.3	19,7	20,0	394,0	996	-	1057	416,294

**Statistik:**

Serie n = 6	Probenbreite b0 mm	Probindicke a0 mm	S0 mm <sup>2</sup>	Rp 0,2 MPa	ReH MPa	Rm MPa	Fmax kN
x	20,0	19,8	395,0	957	-	992	391,681
s	0,0	0,1	1,1	44	-	45	17,594
v	0,00	0,28	0,28	4,62	-	4,56	4,49



**Parametertabelle:**

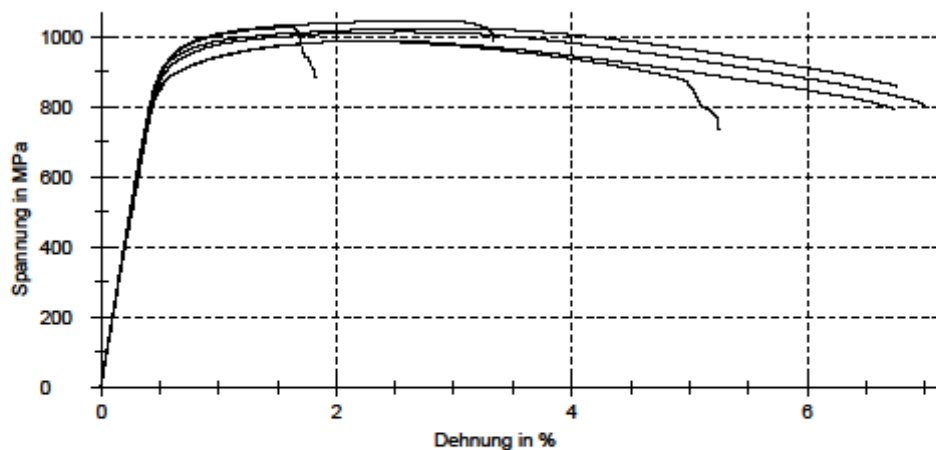
Auftraggeber	: FuE - Liebherr	Prüfer	: Buder
SLV-Kundennr.	: Diplomprojekt Tietböhl	Prüfdatum	: 01.09.2016
SLV-Auftragsnr.	: RUN 6	Bemerkung	: Bruchlage:
Probennr.	: Stumpfnah / UP / PA / beidseitig		Z1.1 - SG
Werkstoff	: S960QL / 50mm		Z1.2 - SG
			Z1.3 - SG
			Z2.1 - SG
			Z2.2 - SG
			Z2.3 - SG

**Ergebnisse:**

Nr	Probenkennz.	Probendicke a0 mm	Probenbreite b0 mm	S0 mm <sup>2</sup>	Rp 0,2 MPa	ReH MPa	Rm MPa	Fmax kN
1	Z1.1	19,8	20,0	396,0	901	-	988	391,417
2	Z1.2	19,8	20,0	396,0	953	-	1023	405,048
3	Z1.3	19,8	20,0	396,0	969	-	1026	406,218
4	Z2.1	19,8	20,0	396,0	897	-	987	390,655
5	Z2.2	19,8	20,0	396,0	942	-	1013	401,276
6	Z2.3	19,8	20,0	396,0	967	-	1044	413,577

**Statistik:**

Serie n = 6	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	S0 mm <sup>2</sup>	Rp 0,2 MPa	ReH MPa	Rm MPa	Fmax kN
x	20,0	19,8	396,0	938	-	1014	401,365
s	0,0	0,0	0,0	32	-	23	8,943
v	0,00	0,00	0,00	3,40	-	2,23	2,23





**Parametertabelle:**

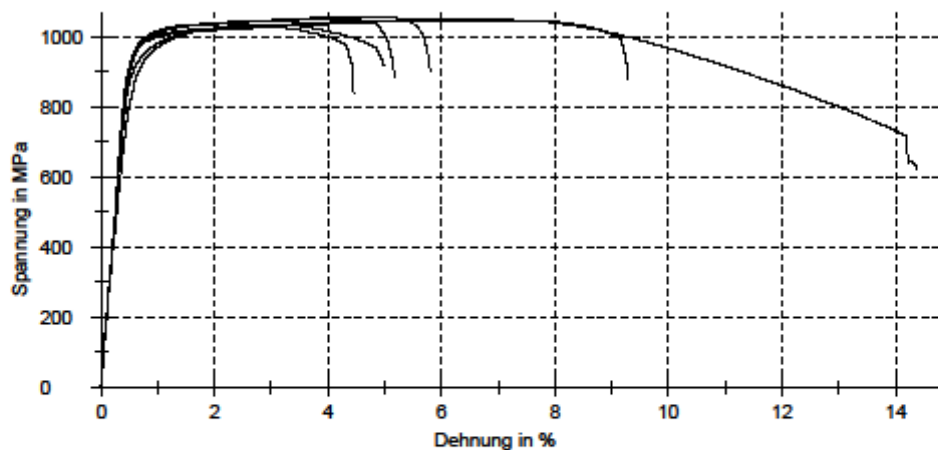
Auftraggeber	: FuE - Liebherr	Prüfer	: Buder
SLV-Kundenr.	: Diplomprojekt Tietböhl	Prüfdatum	: 01.09.2016
SLV-Auftragsnr.	: RUN 7	Bemerkung	: Bruchlage:
Probenr.	: Stumpfnah / UP / PA / beidseitig		Z1.1 - SG
Werkstoff	: S960QL / 50mm		Z1.2 - GW
			Z1.3 - SG
			Z2.1 - SG
			Z2.2 - SG
			Z2.3 - SG

**Ergebnisse:**

Nr	Probenkennz.	Probindicke a0 mm	Probenbreite b0 mm	S0 mm <sup>2</sup>	Rp 0,2 MPa	ReH MPa	Rm MPa	Fmax kN
1	Z1.1	19,8	20,0	396,0	933	-	1029	407,637
2	Z1.2	19,8	20,0	396,0	981	-	1050	415,665
3	Z1.3	19,8	20,0	396,0	985	-	1056	418,326
4	Z2.1	19,8	20,0	396,0	920	-	1035	409,761
5	Z2.2	19,8	20,0	396,0	971	-	1046	414,248
6	Z2.3	19,7	20,0	394,0	976	-	1050	413,571

**Statistik:**

Serie n = 6	Probenbreite b0 mm	Probindicke a0 mm	S0 mm <sup>2</sup>	Rp 0,2 MPa	ReH MPa	Rm MPa	Fmax kN
x	20,0	19,8	395,7	961	-	1044	413,201
s	0,0	0,0	0,8	27	-	10	3,908
v	0,00	0,21	0,21	2,82	-	0,98	0,95



**Parametertabelle:**

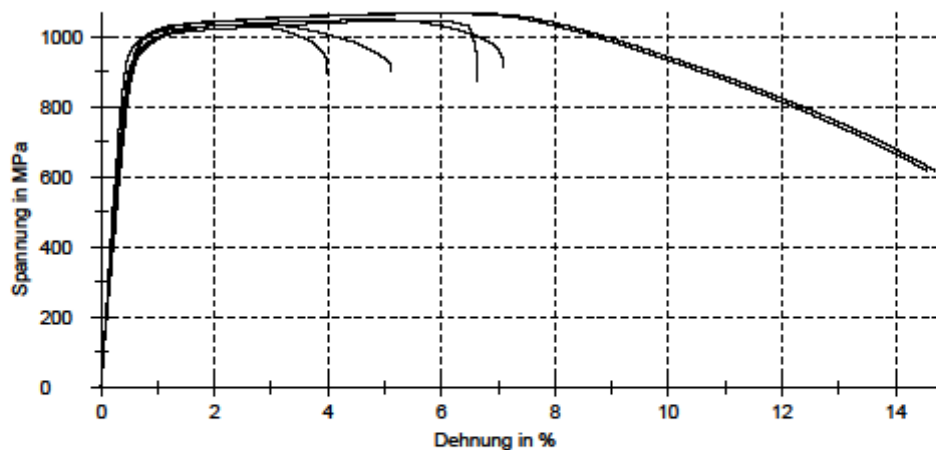
Auftraggeber	: FuE - Liebherr	Prüfer	: Buder
SLV-Kundenr.	: Diplomprojekt Tietböhl	Prüfdatum	: 01.09.2016
SLV-Auftragsnr.	: RUN 8	Bemerkung	: Bruchlage:
Probenr.	: Stumpfnah / UP / PA / beidseitig		Z1.1 - GW
Werkstoff	: S960QL / 50mm		Z1.2 - SG
			Z1.3 - SG
			Z2.1 - GW
			Z2.2 - SG
			Z2.3 - SG

**Ergebnisse:**

Nr	Probenkennz.	Probendicke a0 mm	Probenbreite b0 mm	S0 mm <sup>2</sup>	Rp 0,2 MPa	ReH MPa	Rm MPa	Fmax kN
1	Z1.1	20,1	20,0	402,0	974	-	1067	428,793
2	Z1.2	20,0	20,0	400,0	975	-	1049	419,412
3	Z1.3	20,0	20,0	400,0	956	-	1036	414,389
4	Z2.1	20,0	20,0	400,0	991	-	1069	427,650
5	Z2.2	20,0	20,0	400,0	968	-	1045	418,061
6	Z2.3	20,0	20,0	400,0	940	-	1034	413,491

**Statistik:**

Serie n = 6	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	S0 mm <sup>2</sup>	Rp 0,2 MPa	ReH MPa	Rm MPa	Fmax kN
x	20,0	20,0	400,3	967	-	1050	420,300
s	0,0	0,0	0,8	18	-	15	6,531
v	0,00	0,20	0,20	1,83	-	1,43	1,55



**Parametertabelle:**

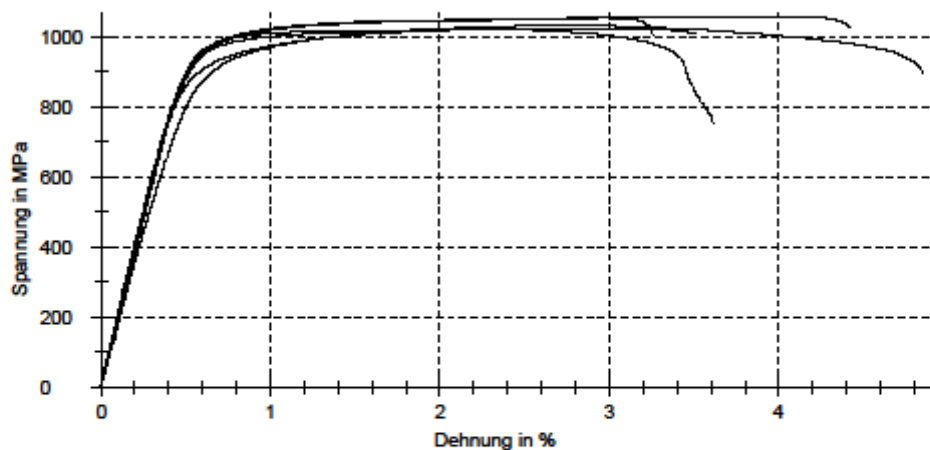
Auftraggeber	: FuE - Liebherr	Prüfer	: Buder
SLV-Kundenr.	: Diplomprojekt Tietböhl	Prüfdatum	: 01.09.2016
SLV-Auftragsnr.	: RUN 9	Bemerkung	: Bruchlage:
Probenr.	: Stumpfnah / UP / PA / beidseitig		Z1.1 - SG
Werkstoff	: S960QL / 50mm		Z1.2 - SG
			Z1.3 - SG
			Z2.1 - SG
			Z2.2 - SG
			Z2.3 - SG

**Ergebnisse:**

Nr	Probenkennz.	Probindicke a0 mm	Probenbreite b0 mm	S0 mm <sup>2</sup>	Rp 0,2 MPa	ReH MPa	Rm MPa	Fmax kN
1	Z1.1	19,8	20,0	396,0	923	-	1031	408,218
2	Z1.2	19,7	20,0	394,0	987	-	1016	400,428
3	Z1.3	19,7	20,0	394,0	984	-	1052	414,652
4	Z2.1	19,8	20,0	396,0	928	-	1020	403,831
5	Z2.2	19,8	20,0	396,0	977	-	1022	404,890
6	Z2.3	19,7	20,0	394,0	985	-	1058	416,881

**Statistik:**

Serie n = 6	Probenbreite b0 mm	Probindicke a0 mm	S0 mm <sup>2</sup>	Rp 0,2 MPa	ReH MPa	Rm MPa	Fmax kN
x	20,0	19,8	395,0	964	-	1033	408,150
s	0,0	0,1	1,1	30	-	18	6,441
v	0,00	0,28	0,28	3,16	-	1,72	1,58



**Parametertabelle:**

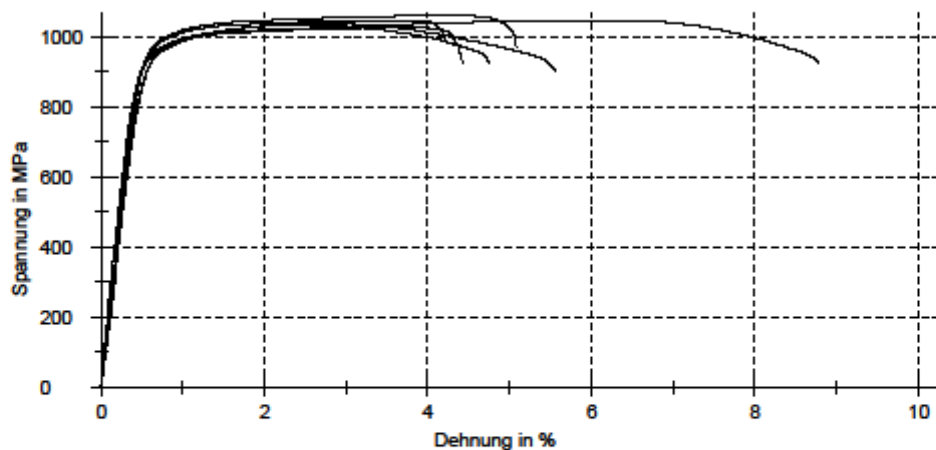
Auftraggeber	: FuE - Liebherr	Prüfer	: Buder
SLV-Kundenr.	: Diplomprojekt Tietböhl	Prüfdatum	: 01.09.2016
SLV-Auftragsnr.	: RUN 10	Bemerkung	: Bruchlage:
Probenr.	: Stumpfnah / UP / PA / beidseitig		Z1.1 - SG
Werkstoff	: S960QL / 50mm		Z1.2 - SG
			Z1.3 - SG
			Z2.1 - SG
			Z2.2 - SG
			Z2.3 - SG

**Ergebnisse:**

Nr	Probenkennz.	Probendicke a0 mm	Probenbreite b0 mm	S0 mm <sup>2</sup>	Rp 0,2 MPa	ReH MPa	Rm MPa	Fmax kN
1	Z1.1	19,7	20,0	394,0	952	-	1033	407,104
2	Z1.2	19,8	20,0	396,0	943	-	1027	406,517
3	Z1.3	19,7	20,0	394,0	980	-	1061	417,947
4	Z2.1	19,9	20,0	398,0	976	-	1047	416,784
5	Z2.2	19,8	20,0	396,0	961	-	1046	414,296
6	Z2.3	19,6	20,0	392,0	949	-	1038	406,830

**Statistik:**

Serie n = 6	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	S0 mm <sup>2</sup>	Rp 0,2 MPa	ReH MPa	Rm MPa	Fmax kN
x	20,0	19,8	395,0	960	-	1042	411,580
s	0,0	0,1	2,1	15	-	12	5,352
v	0,00	0,53	0,53	1,56	-	1,16	1,30



## Protokolle der Härteprüfung

(Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden nur die Tabellen mit den Härtewerten abgebildet. Die Positionierung der einzelnen Messpunkte erfolgte gemäß Abbildung 36.)



## Härteprüfung

### Parametertabelle:

Auftraggeber : Fu E - Tietböhl Diplomarbeit  
 SLV-Kundennr. : —  
 SLV-Auftragsnr. : —  
 Werkstoff : —  
 Probenbez. : Run 1

Bearbeiter : Meißner  
 Prüfdatum : 31.08.2016  
 Bemerkung : 01 - 15 Decklage  
 16 - 30 Mitte  
 31 - 45 Wurzel

### Ergebnisse:

Nr	Nr	d <sub>h</sub> mm	d <sub>v</sub> mm	d mm	HV 10
1	1	0,250	0,247	0,248	301
2	2	0,238	0,243	0,241	320
3	3	0,239	0,235	0,237	330
4	4	-	0,241	0,241	318
5	5	0,228	0,234	0,231	346
6	6	0,217	0,223	0,220	382
7	7	0,218	0,235	0,227	360
8	8	0,228	0,227	0,228	357
9	9	0,221	0,237	0,229	352
10	10	0,217	0,216	0,217	395
11	11	0,212	0,215	0,214	407
12	12	0,235	0,241	0,238	327
13	13	0,239	0,258	0,248	301
14	14	0,249	0,238	0,244	312
15	15	0,236	0,252	0,244	312
Nr	Nr	d <sub>h</sub> mm	d <sub>v</sub> mm	d mm	HV 10
31	31	0,237	0,231	0,234	339
32	32	0,230	0,243	0,237	331
33	33	0,237	0,237	0,237	330
34	34	0,232	0,237	0,234	337
35	35	0,208	0,220	0,214	405
36	36	0,220	0,220	0,220	382
37	37	0,227	0,226	0,227	360
38	38	0,232	-	0,232	346
39	39	0,244	0,238	0,241	319
40	40	0,218	0,222	0,220	382
41	41	0,203	0,212	0,207	431
42	42	0,219	0,222	0,221	381
43	43	0,243	0,237	0,240	322
44	44	0,227	0,242	0,235	336
45	45	0,236	0,236	0,236	333

Nr	Nr	d <sub>h</sub> mm	d <sub>v</sub> mm	d mm	HV 10
16	16	0,242	0,225	0,233	340
17	17	0,227	0,237	0,232	343
18	18	0,238	0,255	0,246	306
19	19	0,244	0,240	0,242	316
20	20	0,222	0,232	0,227	359
21	21	0,231	0,244	0,238	329
22	22	0,240	0,248	0,244	312
23	23	0,239	0,244	0,242	318
24	24	0,242	0,244	0,243	314
25	25	0,241	0,251	0,246	307
26	26	0,233	0,245	0,239	324
27	27	0,235	0,243	0,239	324
28	28	0,238	0,245	0,242	318
29	29	0,232	0,231	0,231	346
30	30	0,239	0,247	0,243	315



## Härteprüfung

### Parametertabelle:

Auftraggeber : Fu E - Tietböhl Diplomarbeit  
 SLV-Kundennr. : —  
 SLV-Auftragsnr. : —  
 Werkstoff : —  
 Probenbez. : Run 2

Bearbeiter : Meißner  
 Prüfdatum : 31.08.2016  
 Bemerkung : 01 - 15 Decklage  
 16 - 30 Mitte  
 31 - 45 Wurzel

### Ergebnisse:

Nr	Nr	d <sub>h</sub> mm	d <sub>v</sub> mm	d mm	HV 10
1	1	0,225	0,236	0,231	348
2	2	0,232	0,238	0,235	336
3	3	0,226	0,232	0,229	352
4	4	0,234	0,241	0,238	329
5	5	0,235	0,242	0,239	326
6	6	0,230	0,221	0,225	365
7	7	0,227	0,238	0,233	342
8	8	0,224	0,221	0,223	374
9	9	0,222	0,228	0,225	365
10	10	0,233	0,242	0,238	329
11	11	0,241	0,238	0,240	323
12	12	0,228	0,234	0,231	346
13	13	0,232	0,238	0,235	336
14	14	0,232	0,244	0,238	327
15	15	0,235	0,239	0,237	330
Nr	Nr	d <sub>h</sub> mm	d <sub>v</sub> mm	d mm	HV 10
31	31	0,253	0,253	0,253	290
32	32	0,243	0,247	0,245	310
33	33	0,237	0,238	0,238	329
34	34	0,227	0,239	0,233	340
35	35	0,212	0,211	0,212	414
36	36	0,232	0,223	0,227	359
37	37	0,226	0,227	0,227	360
38	38	0,232	0,224	0,228	357
39	39	0,234	0,232	0,233	341
40	40	0,205	0,216	0,210	418
41	41	0,219	0,221	0,220	384
42	42	0,233	0,239	0,236	333
43	43	0,237	0,240	0,239	326
44	44	0,237	0,241	0,239	324
45	45	0,243	0,237	0,240	321

Nr	Nr	d <sub>h</sub> mm	d <sub>v</sub> mm	d mm	HV 10
16	16	0,242	0,230	0,236	333
17	17	0,249	0,235	0,242	316
18	18	0,227	0,229	0,228	356
19	19	0,233	0,230	0,231	346
20	20	0,231	0,238	0,234	337
21	21	0,242	0,239	0,241	320
22	22	0,230	0,230	0,230	351
23	23	0,226	0,228	0,227	359
24	24	0,235	0,227	0,231	348
25	25	0,225	0,229	0,227	359
26	26	0,222	0,240	0,231	346
27	27	0,228	0,242	0,235	334
28	28	0,230	0,234	0,232	345
29	29	0,232	0,230	0,231	348
30	30	0,235	0,235	0,235	336

**Parametertabelle:**

Auftraggeber : Fu E - Tietböhl Diplomarbeit  
 SLV-Kundennr. : —  
 SLV-Auftragsnr. : —  
 Werkstoff : —  
 Probenbez. : Run 3

Bearbeiter : Meißner  
 Prüfdatum : 31.08.2016  
 Bemerkung : 01 - 15 Decklage  
 16 - 30 Mitte  
 31 - 45 Wurzel

**Ergebnisse:**

Nr	Nr	d <sub>h</sub> mm	d <sub>v</sub> mm	d mm	HV 10
1	1	0,247	0,247	0,247	305
2	2	0,249	0,252	0,250	296
3	3	0,238	0,236	0,237	330
4	4	0,227	0,242	0,235	336
5	5	0,222	0,219	0,221	381
6	6	0,208	0,221	0,215	403
7	7	0,243	0,237	0,240	322
8	8	0,232	0,238	0,235	336
9	9	0,234	0,235	0,234	337
10	10	0,213	0,220	0,217	395
11	11	0,219	0,220	0,220	384
12	12	0,239	0,252	0,245	308
13	13	0,242	0,237	0,240	323
14	14	0,240	0,239	0,240	323
15	15	0,246	0,239	0,243	315
Nr	Nr	d <sub>h</sub> mm	d <sub>v</sub> mm	d mm	HV 10
31	31	0,245	0,243	0,244	311
32	32	0,243	0,243	0,243	314
33	33	0,234	0,244	0,239	324
34	34	0,245	0,248	0,246	306
35	35	0,216	0,220	0,218	390
36	36	0,210	0,217	0,213	407
37	37	0,235	0,239	0,237	330
38	38	0,236	0,241	0,239	326
39	39	0,242	0,231	0,236	331
40	40	0,220	0,222	0,221	379
41	41	0,228	0,235	0,232	345
42	42	0,242	0,240	0,241	319
43	43	0,240	0,247	0,243	314
44	44	0,236	0,245	0,241	320
45	45	0,239	0,254	0,246	306

Nr	Nr	d <sub>h</sub> mm	d <sub>v</sub> mm	d mm	HV 10
16	16	0,236	0,237	0,236	332
17	17	0,230	0,241	0,235	334
18	18	0,236	0,242	0,239	324
19	19	0,249	0,258	0,253	289
20	20	0,221	0,227	0,224	369
21	21	0,232	0,236	0,234	339
22	22	0,256	0,258	0,257	281
23	23	0,245	0,252	0,248	301
24	24	0,251	0,254	0,252	291
25	25	0,228	0,233	0,231	348
26	26	0,222	0,216	0,219	386
27	27	0,244	0,249	0,246	306
28	28	0,243	0,250	0,246	306
29	29	0,231	0,244	0,238	329
30	30	0,235	0,237	0,236	333

**Härteprüfung****Parametertabelle:**

Auftraggeber : FuE - Tietböhl Diplomarbeit  
 SLV-Kundennr. : —  
 SLV-Auftragsnr. : —  
 Werkstoff : S980QL  
 Probenbez. : Run 4

Bearbeiter : Tietböhl  
 Prüfdatum : 01.09.2016  
 Bemerkung : 01 - 15 Decklage  
 16 - 30 Mitte  
 31 - 45 Wurzel

**Ergebnisse:**

Nr	Nr	d <sub>h</sub> mm	d <sub>v</sub> mm	d mm	HV 10
1	1	0,235	0,235	0,235	335
2	2	0,236	0,235	0,235	335
3	3	0,237	0,238	0,237	329
4	4	0,233	0,233	0,233	342
5	5	0,225	0,226	0,226	364
6	6	0,221	0,221	0,221	379
7	7	0,238	0,236	0,237	330
8	8	0,228	0,233	0,231	348
9	9	0,244	0,242	0,243	314
10	10	0,220	0,222	0,221	380
11	11	0,228	0,222	0,225	367
12	12	0,246	0,247	0,246	306
13	13	0,237	0,237	0,237	330
14	14	0,237	0,236	0,236	332
15	15	0,237	0,237	0,237	330
Nr	Nr	d <sub>h</sub> mm	d <sub>v</sub> mm	d mm	HV 10
31	31	0,232	0,230	0,231	348
32	32	0,235	0,236	0,235	335
33	33	0,239	0,240	0,240	323
34	34	0,218	0,217	0,216	396
35	35	0,219	0,220	0,220	384
36	36	0,221	0,217	0,219	386
37	37	0,241	0,242	0,242	318
38	38	0,242	0,232	0,237	330
39	39	0,239	0,241	0,240	321
40	40	0,220	0,215	0,218	391
41	41	0,220	0,222	0,221	379
42	42	0,224	0,227	0,226	364
43	43	0,235	0,234	0,234	337
44	44	0,239	0,241	0,240	322
45	45	0,235	0,234	0,235	337

Nr	Nr	d <sub>h</sub> mm	d <sub>v</sub> mm	d mm	HV 10
16	16	0,241	0,238	0,240	323
17	17	0,238	0,237	0,238	329
18	18	0,234	0,236	0,235	337
19	19	0,239	0,238	0,238	326
20	20	0,242	0,237	0,240	323
21	21	0,233	0,234	0,234	339
22	22	0,242	0,243	0,242	315
23	23	0,243	0,247	0,245	310
24	24	0,236	0,236	0,236	333
25	25	0,223	0,219	0,221	379
26	26	0,221	0,221	0,221	380
27	27	0,224	0,223	0,224	370
28	28	0,243	0,242	0,243	315
29	29	0,228	0,229	0,229	355
30	30	0,242	0,244	0,243	314



**Parametertabelle:**

Auftraggeber : FuE - Tietböhl Diplomarbeit  
 SLV-Kundennr. : —  
 SLV-Auftragsnr. : —  
 Werkstoff : S980QL  
 Probenbez. : Run 5

Bearbeiter : Tietböhl  
 Prüfdatum : 01.09.2016  
 Bemerkung : 01 - 15 Decklage  
 16 - 30 Mitte  
 31 - 45 Wurzel

**Ergebnisse:**

Nr	Nr	d <sub>h</sub> mm	d <sub>v</sub> mm	d mm	HV 10
1	1	0,231	0,240	0,235	334
2	2	0,237	0,237	0,237	330
3	3	0,237	0,237	0,237	330
4	4	0,242	0,239	0,241	320
5	5	0,239	0,239	0,239	324
6	6	0,217	0,219	0,218	390
7	7	0,234	0,235	0,234	337
8	8	0,221	0,224	0,222	375
9	9	0,232	0,227	0,229	352
10	10	0,216	0,220	0,218	390
11	11	0,229	0,226	0,228	357
12	12	0,242	0,240	0,241	319
13	13	0,241	0,250	0,245	308
14	14	0,231	0,235	0,233	340
15	15	0,238	0,239	0,239	326
Nr	Nr	d <sub>h</sub> mm	d <sub>v</sub> mm	d mm	HV 10
31	31	0,239	0,239	0,239	324
32	32	0,235	0,239	0,237	330
33	33	0,235	0,236	0,235	334
34	34	0,211	0,208	0,209	423
35	35	0,217	0,213	0,215	401
36	36	0,215	0,217	0,216	397
37	37	0,230	0,226	0,228	356
38	38	0,231	0,227	0,229	354
39	39	0,222	0,228	0,225	365
40	40	0,221	0,224	0,223	374
41	41	0,212	0,212	0,212	413
42	42	0,244	0,235	0,240	323
43	43	0,240	0,240	0,240	322
44	44	0,241	0,237	0,239	324
45	45	0,244	0,245	0,245	310

Nr	Nr	d <sub>h</sub> mm	d <sub>v</sub> mm	d mm	HV 10
16	16	0,230	0,232	0,231	348
17	17	0,241	0,243	0,242	316
18	18	0,233	0,238	0,235	334
19	19	0,219	0,223	0,221	379
20	20	0,247	0,243	0,245	308
21	21	0,237	0,238	0,238	329
22	22	0,220	0,215	0,218	391
23	23	0,211	0,229	0,220	383
24	24	0,221	0,216	0,219	388
25	25	0,230	0,228	0,229	354
26	26	0,234	0,232	0,233	342
27	27	0,233	0,233	0,233	342
28	28	0,233	0,238	0,235	334
29	29	0,233	0,233	0,233	341
30	30	0,237	0,237	0,237	330

**Parametertabelle:**

Auftraggeber : FuE - Tietböhl Diplomarbeit  
 SLV-Kundennr. : —  
 SLV-Auftragsnr. : —  
 Werkstoff : S980QL  
 Probenbez. : Run 6

Bearbeiter : Tietböhl  
 Prüfdatum : 01.09.2016  
 Bemerkung : 01 - 15 Decklage  
 16 - 30 Mitte  
 31 - 45 Wurzel

**Ergebnisse:**

Nr	Nr	d <sub>h</sub> mm	d <sub>v</sub> mm	d mm	HV 10
1	1	0,239	0,239	0,239	325
2	2	0,233	0,233	0,233	342
3	3	0,238	0,237	0,238	329
4	4	0,220	0,215	0,218	391
5	5	0,220	0,228	0,224	370
6	6	0,213	0,219	0,216	397
7	7	0,240	0,244	0,242	317
8	8	0,240	0,250	0,245	310
9	9	0,250	0,250	0,250	297
10	10	0,220	0,220	0,220	382
11	11	0,216	0,216	0,216	397
12	12	0,236	0,233	0,234	337
13	13	0,236	0,238	0,237	330
14	14	0,241	0,240	0,241	320
15	15	0,240	0,243	0,242	318
Nr	Nr	d <sub>h</sub> mm	d <sub>v</sub> mm	d mm	HV 10
31	31	0,240	0,233	0,236	332
32	32	0,234	0,233	0,233	341
33	33	0,238	0,236	0,237	330
34	34	0,234	0,237	0,235	334
35	35	0,224	0,221	0,223	374
36	36	0,221	0,214	0,218	391
37	37	0,232	0,235	0,233	340
38	38	0,235	0,232	0,233	340
39	39	0,227	0,233	0,230	349
40	40	0,217	0,218	0,218	391
41	41	0,217	0,225	0,221	379
42	42	0,223	0,222	0,223	374
43	43	0,233	0,234	0,233	340
44	44	0,236	0,239	0,237	330
45	45	0,234	0,230	0,232	343

Nr	Nr	d <sub>h</sub> mm	d <sub>v</sub> mm	d mm	HV 10
16	16	0,244	0,251	0,247	303
17	17	0,239	0,254	0,246	306
18	18	0,236	0,230	0,233	342
19	19	0,232	0,232	0,232	345
20	20	0,221	0,220	0,221	381
21	21	0,221	0,227	0,224	369
22	22	0,239	0,235	0,237	330
23	23	0,245	0,244	0,245	310
24	24	0,223	0,230	0,227	360
25	25	0,214	0,217	0,216	399
26	26	0,215	0,220	0,218	391
27	27	0,244	0,243	0,244	312
28	28	0,232	0,237	0,234	337
29	29	0,240	0,239	0,239	324
30	30	0,235	0,233	0,234	339

**Parametertabelle:**

Auftraggeber : FuE - Tietböhl Diplomarbeit  
 SLV-Kundennr. : —  
 SLV-Auftragsnr. : —  
 Werkstoff : S980QL  
 Probenbez. : Run 7

Bearbeiter : Meißner  
 Prüfdatum : 02.09.2016  
 Bemerkung : 01 - 15 Decklage  
 16 - 30 Mitte  
 31 - 45 Wurzel

**Ergebnisse:**

Nr	Nr	d <sub>h</sub> mm	d <sub>v</sub> mm	d mm	HV 10
1	1	0,232	0,236	0,234	339
2	2	0,236	0,238	0,237	330
3	3	0,238	0,241	0,240	323
4	4	0,237	0,229	0,233	342
5	5	0,207	0,211	0,209	425
6	6	0,213	0,217	0,215	401
7	7	0,224	0,229	0,227	360
8	8	0,227	0,232	0,230	351
9	9	0,226	0,233	0,230	351
10	10	0,211	0,215	0,213	408
11	11	0,215	0,216	0,216	399
12	12	0,219	0,216	0,218	391
13	13	0,233	0,236	0,234	337
14	14	0,232	0,234	0,233	342
15	15	0,231	0,237	0,234	339
Nr	Nr	d <sub>h</sub> mm	d <sub>v</sub> mm	d mm	HV 10
31	31	0,228	0,237	0,233	342
32	32	0,237	0,243	0,240	322
33	33	0,240	0,239	0,240	323
34	34	0,250	0,241	0,246	307
35	35	0,215	0,226	0,221	381
36	36	0,216	0,224	0,220	382
37	37	0,235	0,244	0,240	323
38	38	0,237	0,237	0,237	330
39	39	0,233	0,240	0,236	332
40	40	0,218	0,219	0,219	388
41	41	0,218	0,216	0,217	393
42	42	0,225	0,217	0,221	379
43	43	0,234	0,240	0,237	330
44	44	0,228	0,234	0,231	346
45	45	0,237	0,233	0,235	336

Nr	Nr	d <sub>h</sub> mm	d <sub>v</sub> mm	d mm	HV 10
16	16	0,242	0,237	0,240	323
17	17	0,235	0,239	0,237	330
18	18	0,240	0,242	0,241	319
19	19	0,240	0,238	0,239	324
20	20	0,234	0,236	0,235	336
21	21	0,253	0,235	0,244	311
22	22	0,238	0,236	0,237	330
23	23	0,236	0,230	0,233	342
24	24	0,232	0,228	0,230	351
25	25	0,239	0,228	0,233	340
26	26	0,234	0,225	0,229	352
27	27	0,240	0,235	0,238	329
28	28	0,243	0,235	0,239	324
29	29	0,235	0,234	0,234	337
30	30	0,239	0,231	0,235	336



## Härteprüfung

### Parametertabelle:

Auftraggeber : FuE - Tietböhl Diplomarbeit  
 SLV-Kundennr. : —  
 SLV-Auftragsnr. : —  
 Werkstoff : S980QL  
 Probenbez. : Run 8

Bearbeiter : Meißner  
 Prüfdatum : 02.09.2016  
 Bemerkung : 01 - 15 Decklage  
 16 - 30 Mitte  
 31 - 45 Wurzel

### Ergebnisse:

Nr	Nr	d <sub>h</sub> mm	d <sub>v</sub> mm	d mm	HV 10
1	1	0,230	0,248	0,239	326
2	2	0,228	0,227	0,228	357
3	3	0,230	0,235	0,232	343
4	4	0,222	0,228	0,225	365
5	5	0,208	0,208	0,208	429
6	6	0,203	0,211	0,207	433
7	7	0,217	0,230	0,224	370
8	8	0,223	0,243	0,233	341
9	9	0,243	0,250	0,246	306
10	10	0,208	0,213	0,210	418
11	11	0,206	0,205	0,205	439
12	12	0,234	0,231	0,232	343
13	13	0,225	0,229	0,227	359
14	14	0,237	0,232	0,235	337
15	15	0,237	0,231	0,234	339
Nr	Nr	d <sub>h</sub> mm	d <sub>v</sub> mm	d mm	HV 10
31	31	0,236	0,241	0,239	326
32	32	0,235	0,229	0,232	345
33	33	0,236	0,230	0,233	342
34	34	0,236	0,230	0,233	342
35	35	0,219	0,208	0,214	407
36	36	0,220	0,217	0,219	388
37	37	0,230	0,237	0,233	340
38	38	0,250	0,255	0,252	291
39	39	0,226	0,231	0,229	354
40	40	0,217	0,216	0,217	395
41	41	0,221	0,221	0,221	379
42	42	0,217	0,208	0,213	410
43	43	0,233	0,234	0,233	340
44	44	0,233	0,236	0,234	337
45	45	0,231	0,238	0,234	337

Nr	Nr	d <sub>h</sub> mm	d <sub>v</sub> mm	d mm	HV 10
16	16	0,231	0,236	0,233	340
17	17	0,243	0,240	0,242	318
18	18	0,242	-	0,242	317
19	19	0,255	0,243	0,249	298
20	20	0,216	0,213	0,215	403
21	21	0,212	0,216	0,214	405
22	22	0,219	0,227	0,223	372
23	23	0,227	0,223	0,225	365
24	24	0,231	0,236	0,233	340
25	25	0,228	0,237	0,233	342
26	26	0,217	0,222	0,220	384
27	27	0,234	0,240	0,237	330
28	28	0,235	0,237	0,236	333
29	29	0,236	0,226	0,231	348
30	30	0,220	0,255	0,237	329

**Parametertabelle:**

Auftraggeber : FuE - Tietbühl Diplomarbeit  
 SLV-Kundennr. : —  
 SLV-Auftragsnr. : —  
 Werkstoff : S980QL  
 Probenbez. : Run 9

Bearbeiter : Meißner  
 Prüfdatum : 02.09.2016  
 Bemerkung : 01 - 15 Decklage  
 16 - 30 Mitte  
 31 - 45 Wurzel

**Ergebnisse:**

Nr	Nr	d <sub>h</sub> mm	d <sub>v</sub> mm	d mm	HV 10
1	1	0,239	0,242	0,241	320
2	2	0,233	0,244	0,239	326
3	3	0,233	0,230	0,231	346
4	4	0,243	0,239	0,241	319
5	5	0,209	0,212	0,210	418
6	6	0,219	0,209	0,214	405
7	7	0,242	0,252	0,247	305
8	8	0,234	0,237	0,235	334
9	9	0,226	0,233	0,230	351
10	10	0,220	0,212	0,216	397
11	11	0,222	0,223	0,223	374
12	12	0,228	0,226	0,227	359
13	13	0,237	0,243	0,240	322
14	14	0,234	0,238	0,236	333
15	15	0,231	0,243	0,237	330
Nr	Nr	d <sub>h</sub> mm	d <sub>v</sub> mm	d mm	HV 10
31	31	0,233	0,247	0,240	323
32	32	0,239	0,249	0,244	312
33	33	0,241	0,239	0,240	322
34	34	0,244	0,247	0,245	308
35	35	0,212	0,225	0,219	388
36	36	0,219	0,226	0,223	374
37	37	0,230	0,230	0,230	351
38	38	0,238	0,240	0,239	324
39	39	0,233	0,231	0,232	345
40	40	0,214	0,222	0,218	390
41	41	0,204	0,217	0,210	418
42	42	0,242	0,239	0,241	320
43	43	0,230	0,235	0,232	343
44	44	0,231	0,233	0,232	345
45	45	0,238	0,230	0,234	339

Nr	Nr	d <sub>h</sub> mm	d <sub>v</sub> mm	d mm	HV 10
16	16	0,219	0,241	0,230	349
17	17	0,244	0,241	0,243	315
18	18	0,235	0,257	0,246	307
19	19	0,239	0,248	0,243	314
20	20	0,239	0,242	0,241	320
21	21	0,241	0,241	0,241	319
22	22	0,219	0,214	0,217	395
23	23	0,217	0,223	0,220	382
24	24	0,219	0,226	0,223	374
25	25	0,256	0,247	0,251	294
26	26	0,227	0,231	0,229	352
27	27	0,236	0,237	0,236	332
28	28	0,237	0,236	0,236	332
29	29	0,234	0,247	0,240	322
30	30	0,233	0,235	0,234	339



## Härteprüfung

### Parametertabelle:

Auftraggeber : FuE - Tietböhl Diplomarbeit  
 SLV-Kundennr. : —  
 SLV-Auftragsnr. : —  
 Werkstoff : S980QL  
 Probenbez. : Run 10

Bearbeiter : Meißner  
 Prüfdatum : 02.09.2016  
 Bemerkung : 01 - 15 Decklage  
 16 - 30 Mitte  
 31 - 45 Wurzel

### Ergebnisse:

Nr	Nr	d <sub>h</sub> mm	d <sub>v</sub> mm	d mm	HV 10
1	1	0,234	0,235	0,234	337
2	2	0,238	0,235	0,236	332
3	3	0,242	0,236	0,239	324
4	4	0,217	0,226	0,222	377
5	5	0,242	0,235	0,239	326
6	6	0,222	0,230	0,226	362
7	7	0,251	0,238	0,245	310
8	8	0,222	0,224	0,223	372
9	9	0,243	0,238	0,241	320
10	10	0,211	0,205	0,208	429
11	11	0,208	0,215	0,212	414
12	12	0,241	0,240	0,241	320
13	13	0,230	0,237	0,233	340
14	14	0,233	0,243	0,238	326
15	15	0,230	0,239	0,234	337
Nr	Nr	d <sub>h</sub> mm	d <sub>v</sub> mm	d mm	HV 10
31	31	0,230	0,239	0,235	337
32	32	0,235	0,230	0,232	343
33	33	0,225	0,233	0,229	352
34	34	0,239	0,225	0,232	345
35	35	0,234	0,235	0,234	337
36	36	0,218	0,214	0,215	401
37	37	0,218	0,231	0,225	367
38	38	0,218	0,229	0,223	374
39	39	0,234	0,233	0,233	340
40	40	0,218	-	0,218	389
41	41	0,218	0,220	0,218	390
42	42	0,232	0,229	0,230	349
43	43	0,245	0,229	0,237	330
44	44	0,234	0,233	0,233	340
45	45	0,233	0,229	0,231	348

Nr	Nr	d <sub>h</sub> mm	d <sub>v</sub> mm	d mm	HV 10
16	16	0,224	0,230	0,227	359
17	17	0,235	0,226	0,230	349
18	18	0,235	0,230	0,232	343
19	19	0,239	0,231	0,235	336
20	20	0,237	0,224	0,230	349
21	21	0,231	0,229	0,230	351
22	22	0,239	0,229	0,234	339
23	23	0,237	0,228	0,232	343
24	24	0,231	0,222	0,226	362
25	25	0,225	0,233	0,229	352
26	26	0,230	0,233	0,231	346
27	27	0,242	0,235	0,239	326
28	28	0,238	0,243	0,239	324
29	29	0,239	0,226	0,232	343
30	30	0,237	0,236	0,236	332



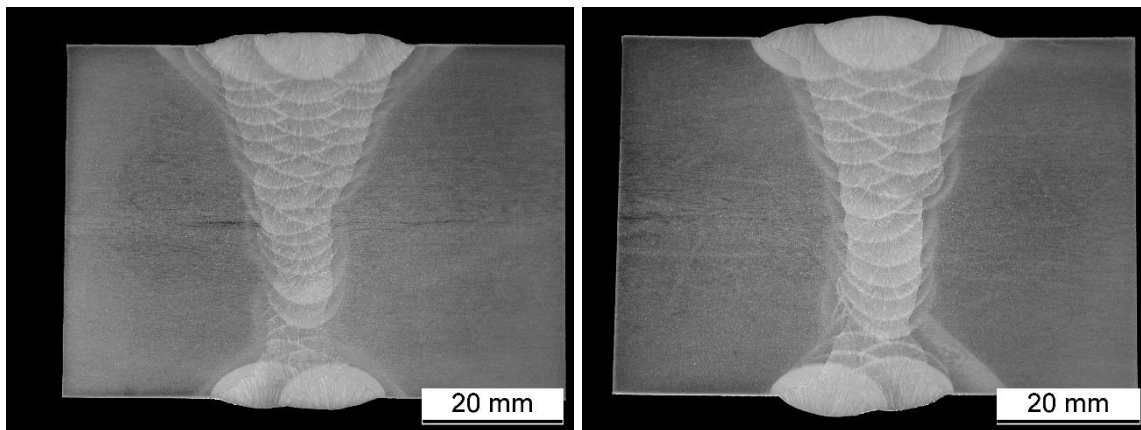
**Makroschliffe**

Abbildung 74 - Makroschliff links: Run 2 / rechts: Run 3 (Ätzung: nach Adler)

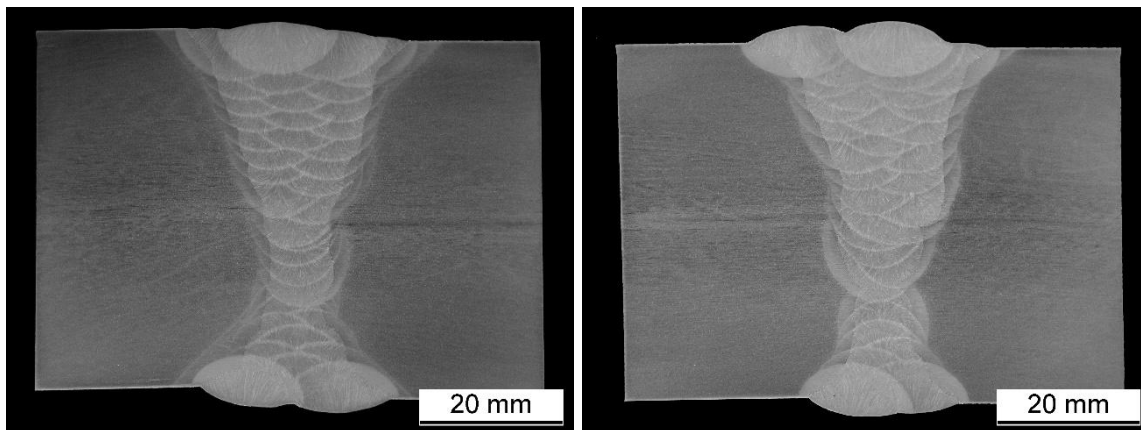


Abbildung 75 - Makroschliff links: Run 4 / rechts: Run 6 (Ätzung: nach Adler)

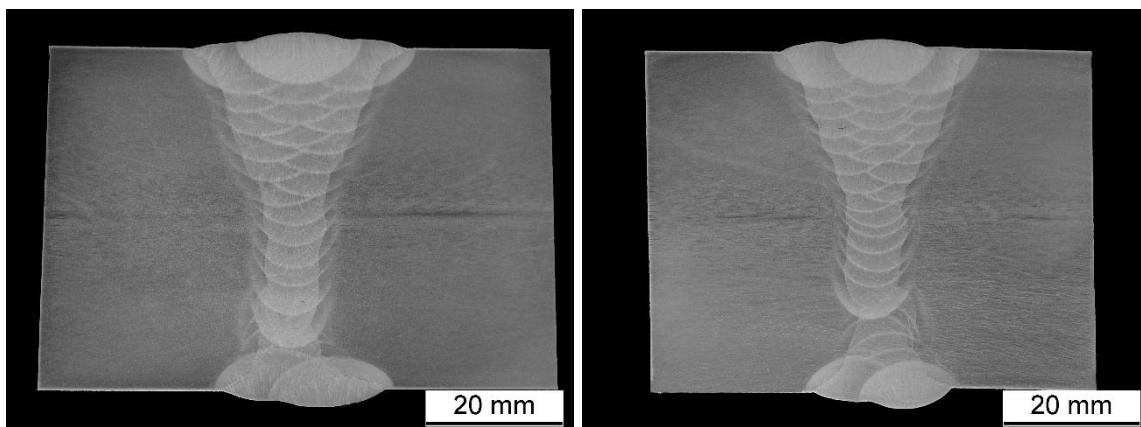


Abbildung 76 - Makroschliff links: Run 7 / rechts: Run 8 (Ätzung: nach Adler)

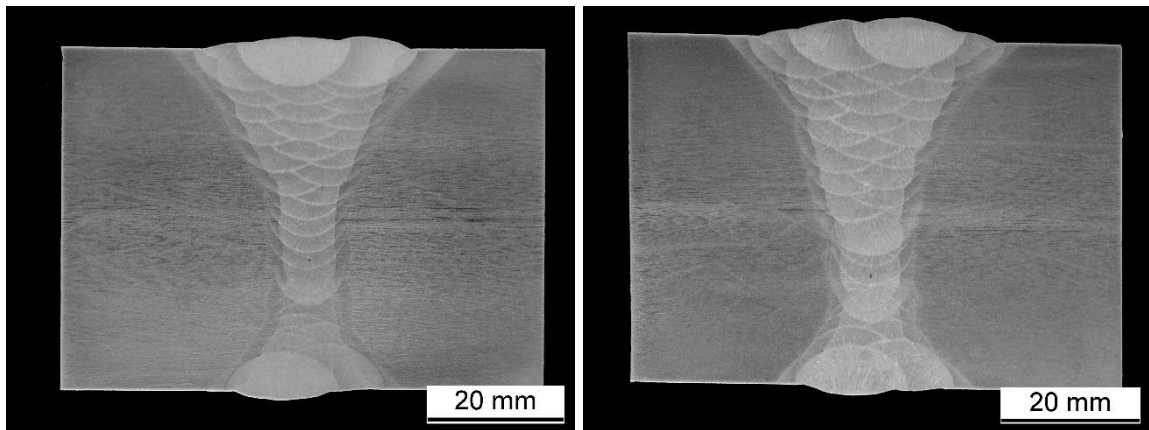


Abbildung 77 - Makroschliff links: Run 9 / rechts Run 10 (Ätzung: nach Adler)

### *Mikroschliffe*

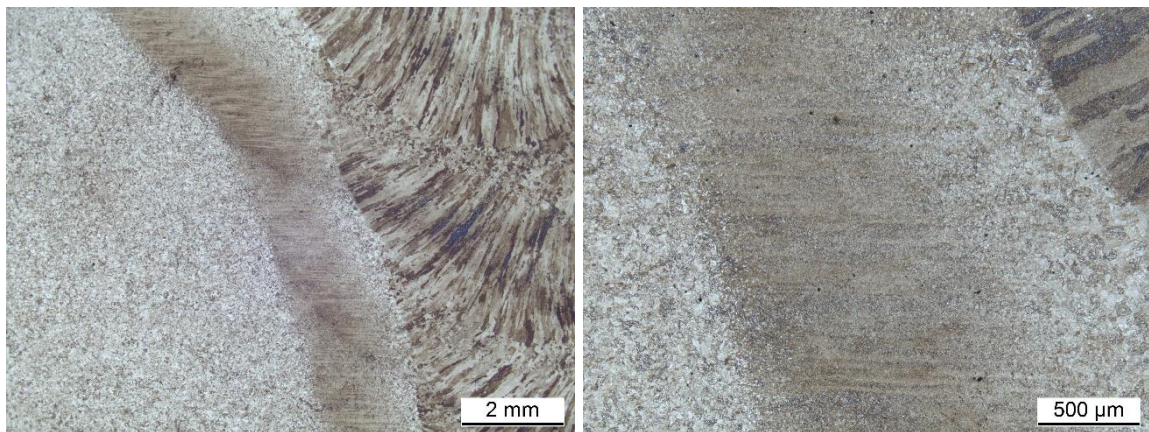


Abbildung 78 - Mikroschliff links Run 6 Übersicht 12,5-fach / rechts: Übersicht 50-fach (Ätzung: Nital)

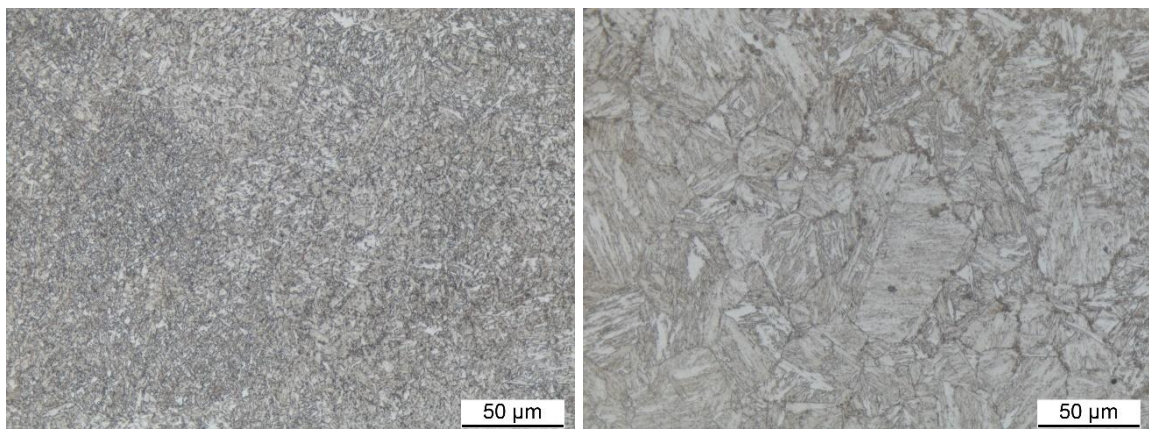
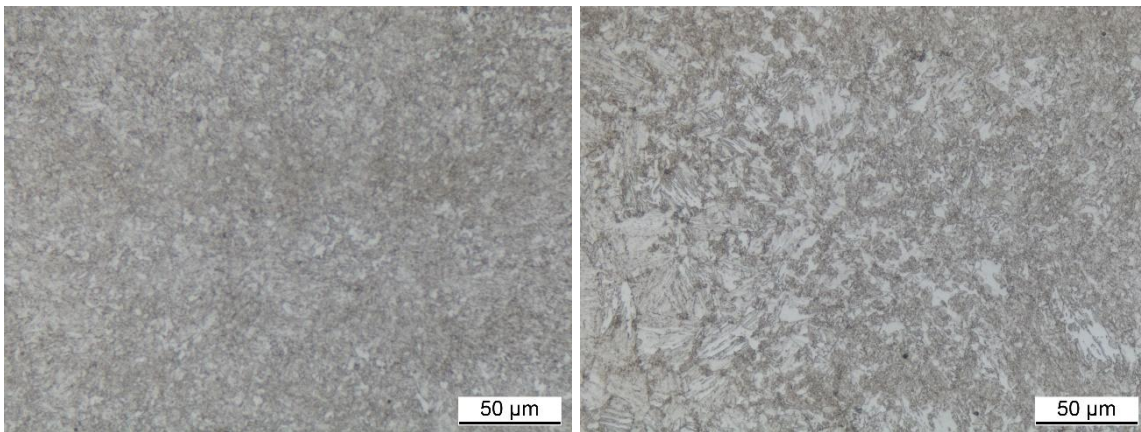
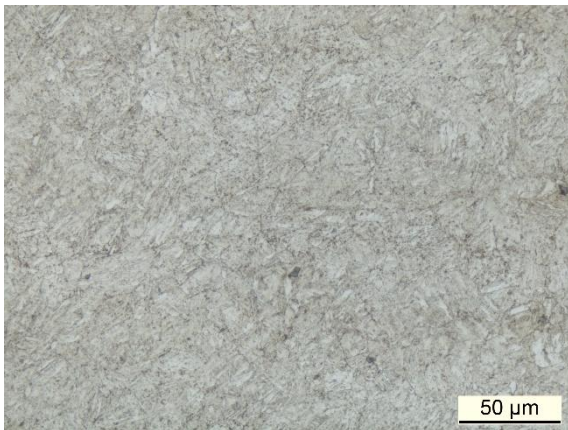


Abbildung 79 - Mikroschliff rechts: Run 6 Schweißgut 500-fach / rechts: Grobkornzone 500-fach (Ätzung: Nital)

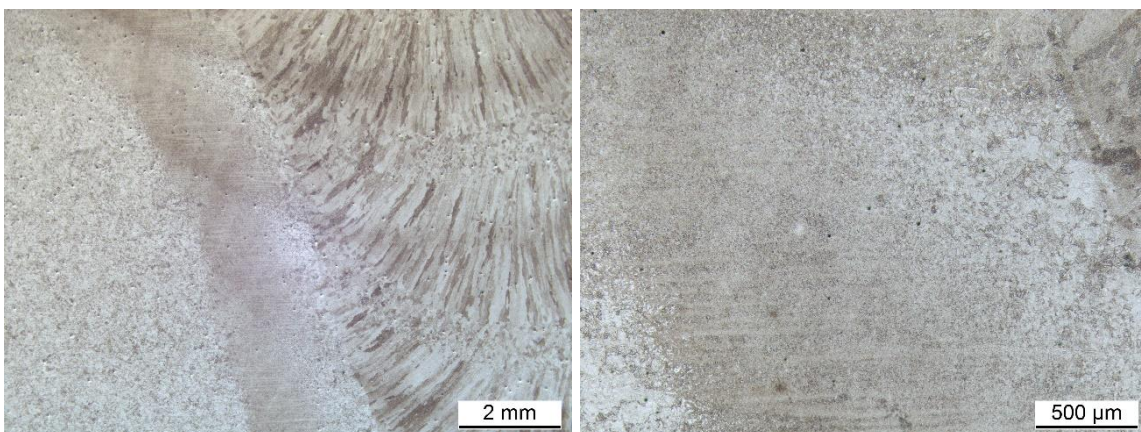




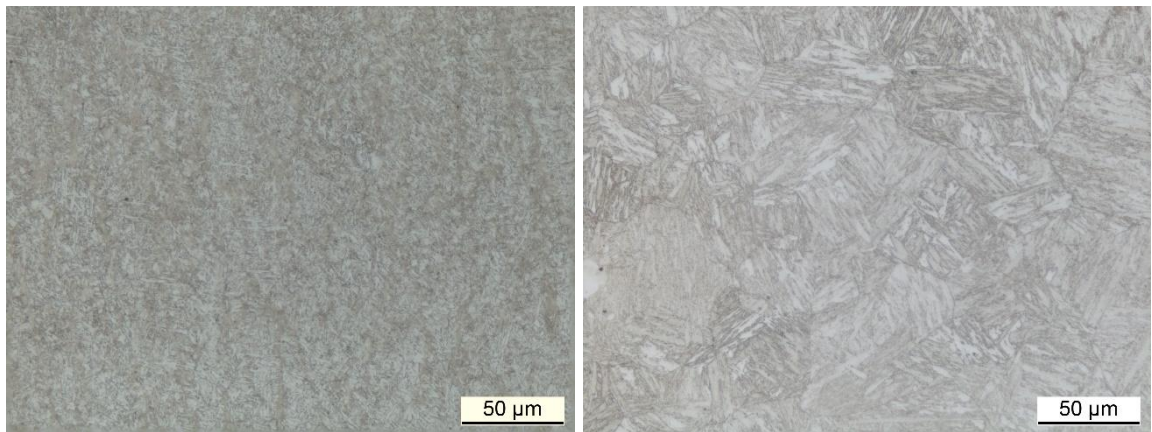
**Abbildung 80 - Mikroschliff Run 6 links: Feinkornzone 500-fach / rechts: Zone der teilweisen Gefügeum-wandlung 500-fach (Ätzung: Nital)**



**Abbildung 81 - Mikroschliff Run 6 unbeeinflusster Grundwerkstoff 500-fach (Ätzung: Nital)**

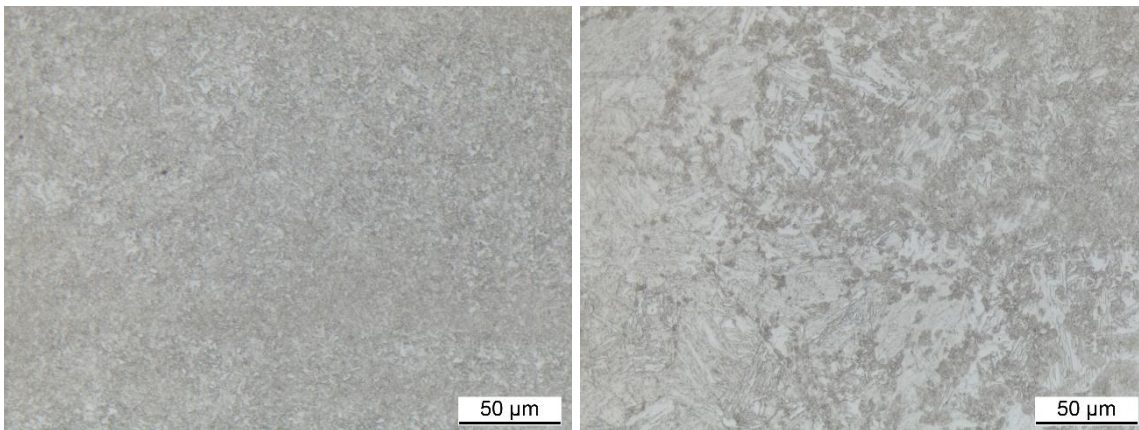


**Abbildung 82 - Mikroschliff links Run 7 Übersicht 12,5-fach / rechts: Übersicht 50-fach (Ätzung: Nital)**

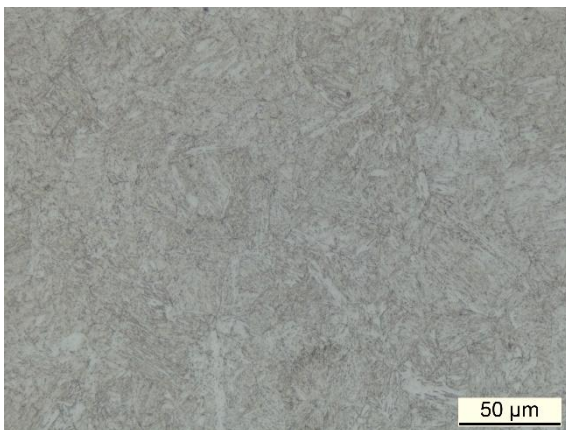


**Abbildung 83 - Mikroschliff rechts: Run 7 Schweißgut 500-fach / rechts: Grobkornzone 500-fach (Ätzung: Nital)**

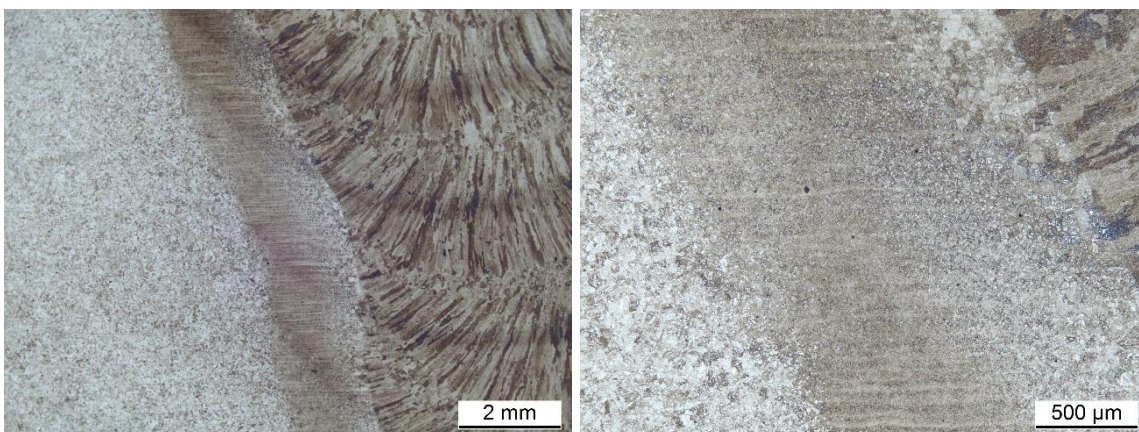




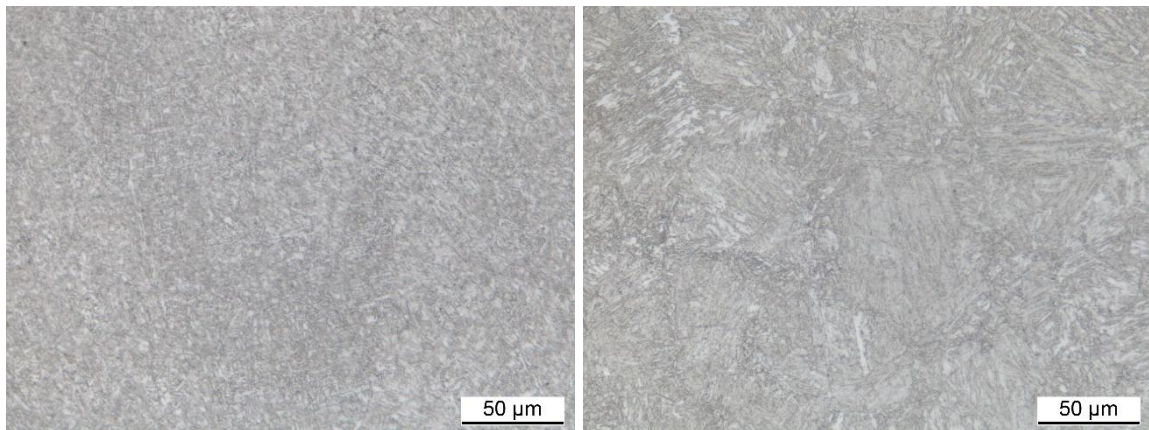
**Abbildung 84 - Mikroschliff Run 7 links: Feinkornzone 500-fach / rechts: Zone der teilweisen Gefügeumwandlung 500-fach (Ätzung: Nital)**



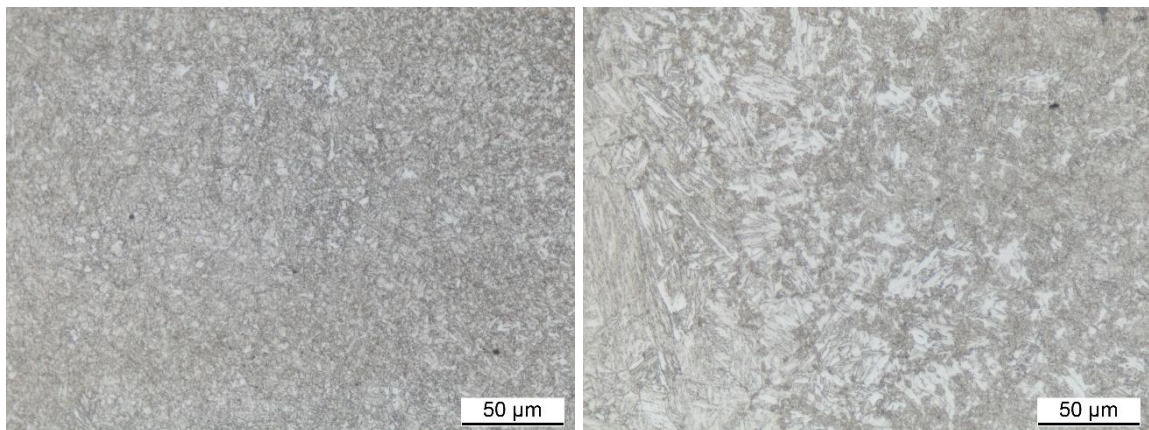
**Abbildung 85 - Mikroschliff Run 7 unbeeinflusster Grundwerkstoff 500-fach (Ätzung: Nital)**



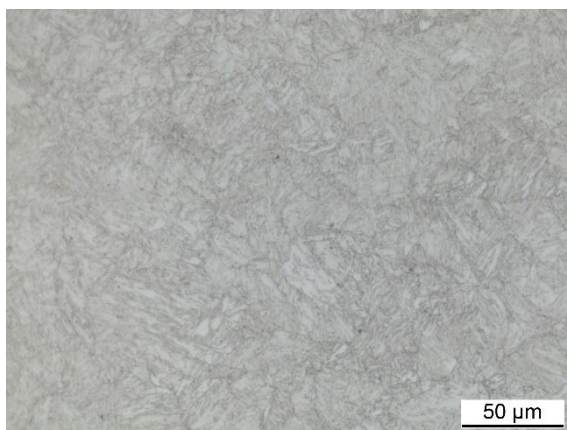
**Abbildung 86 - Mikroschliff links Run 8 Übersicht 12,5-fach / rechts: Übersicht 50-fach (Ätzung: Nital)**



**Abbildung 87 - Mikroschliff rechts: Run 8 Schweißgut 500-fach / rechts: Grobkornzone 500-fach (Ätzung: Nital)**

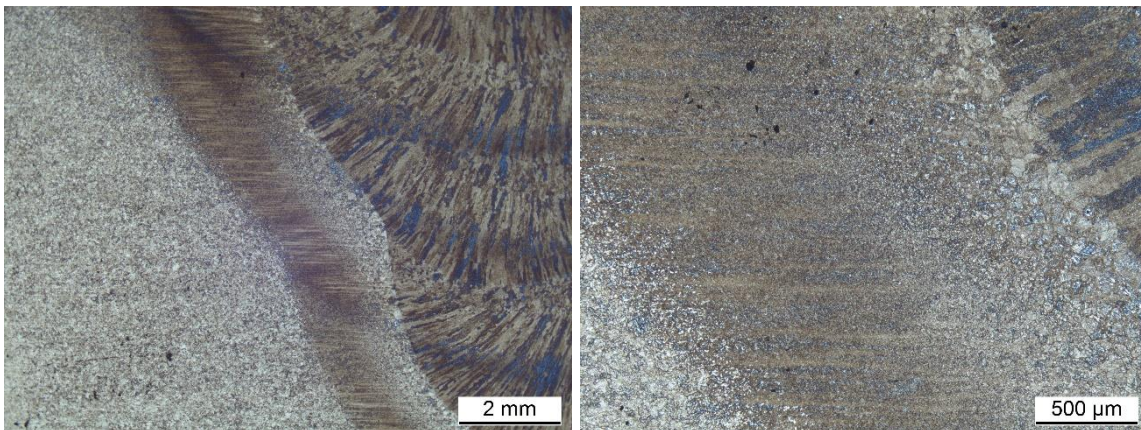


**Abbildung 88 - Mikroschliff Run 8 links: Feinkornzone 500-fach / rechts: Zone der teilweisen Gefügeumwandlung 500-fach (Ätzung: Nital)**

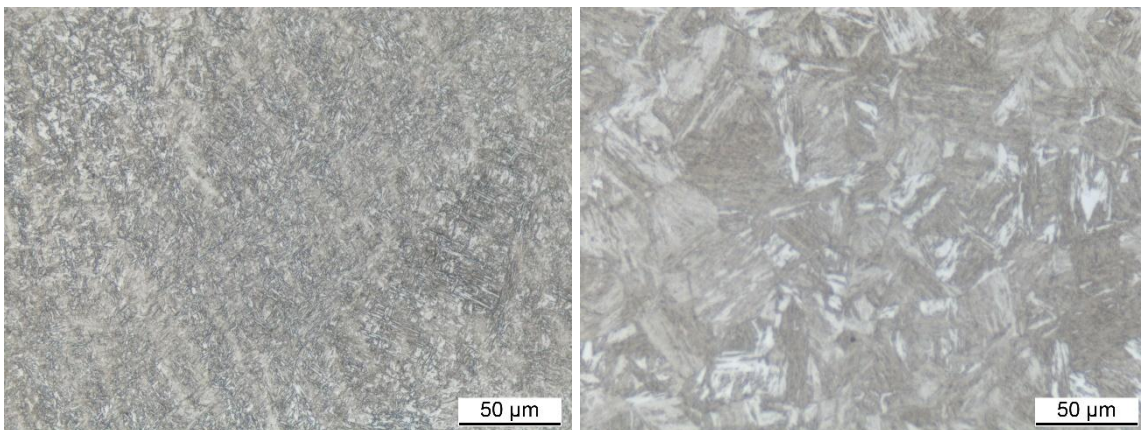


**Abbildung 89 - Mikroschliff Run 8 unbeeinflusster Grundwerkstoff 500-fach (Ätzung: Nital)**

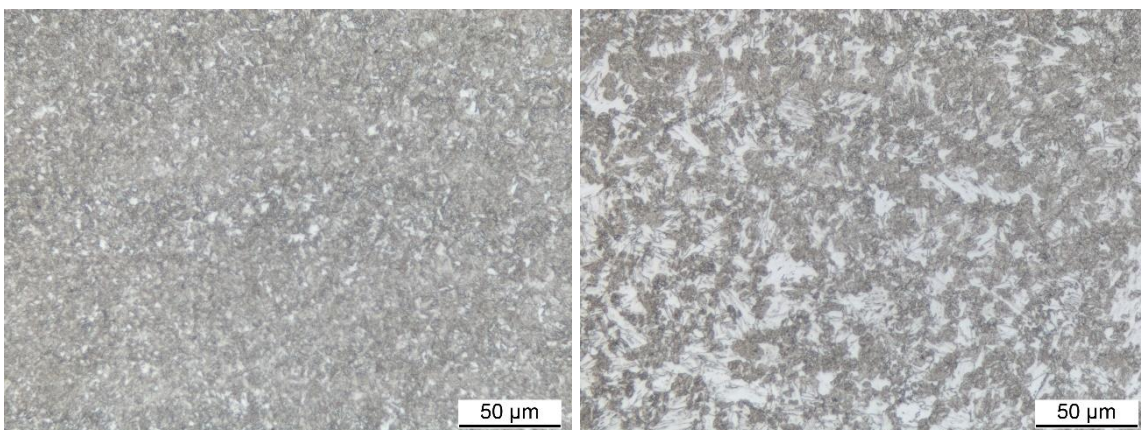




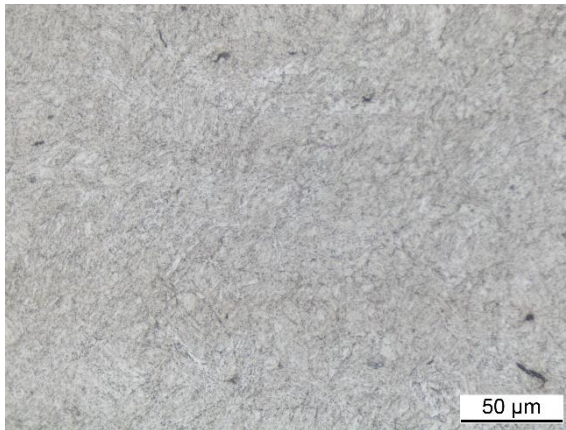
**Abbildung 90 - Mikroschliff links Run 9 Übersicht 12,5-fach / rechts: Übersicht 50-fach (Ätzung: Nital)**



**Abbildung 91 - Mikroschliff rechts: Run 9 Schweißgut 500-fach / rechts: Grobkornzone 500-fach (Ätzung: Nital)**



**Abbildung 92 - Mikroschliff Run 9 links: Feinkornzone 500-fach / rechts: Zone der teilweisen Gefügeumwandlung 500-fach (Ätzung: Nital)**



**Abbildung 93 - Mikroschliff Run 9 unbeeinflusster Grundwerkstoff 500-fach (Ätzung: Nital)**

## Anlagen, Teil 3

Dieses Kapitel enthält die Prüfprotokolle des Hauptversuches:

- Schweißdaten
- Datenblatt Schweißzusatzwerkstoff Union X96 (für Wurzellage)
- Protokoll der Sichtprüfung
- Protokoll der Magnetpulverprüfung
- Protokoll der Ultraschallprüfung
- Protokolle der Kerbschlagbiegeversuche
- Protokoll der Zugversuche
- Protokoll der Biegeversuche
- Protokoll der Härteprüfung

**Tabelle 19 - Übersicht Schweißdaten Hauptversuch**

<b>Wurzellage auf keramischer Badsicherung:</b>					
Verfahren:			135		
Zusatzwerkstoff:			Union X96		
Durchmesser Zusatzwerkstoff:			1,0 mm		
Schweißstrom:			100 A - 110 A		
Schweißspannung:			20 V - 21 V		
Schweißgeschwindigkeit:			30 cm/min		
Drahtvorschub:			5,2 m/min		
<b>Füll- und Decklagen:</b>					
Verfahren:			121		
Zusatzwerkstoff:			UP-101 NiCrMo 2,5		
Durchmesser Zusatzwerkstoff:			2,4 mm		
Schweißstrom:			300 A / 400 A		
Schweißspannung:			30 V / 28 V		
Schweißgeschwindigkeit:			90 cm/min / 45 cm/min		
Schweißraupe	Stromstärke / Spannung Kopf 1	Stromstärke / Spannung Kopf 2	Schweißgeschwindigkeit	Vorwärm- / Zwischenlagentemperatur	Lage
1	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	M*
2	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	L
3	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	R
4	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	L
5	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	R
6	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	L
7	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	R
8	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	M
9	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	L
10	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	R
11	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	M
(Schweißprobe gedreht)					
1 (12)	400 A / 28	-	45 cm/min	105°C	M



	V				
2 (13)	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	M
3 (14)	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	L
4 (15)	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	R
5 (16)	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	L
6 (17)	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	R
7 (18)	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	L
8 (19)	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	R
9 (20)	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	M
10 (21)	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	L
11 (22)	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	R
12 (23)	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	M

weiter Tabelle 12 - Übersicht Schweißdaten Hauptversuch

13 (24)	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	L
14 (25)	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	R
15 (26)	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	M
16 (27)	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	L
17 (28)	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	R
18 (29)	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	ML
19 (30)	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	MR
20 (31)	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	L
21 (32)	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	R
22 (33)	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	ML
23 (34)	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	MR
24 (35)	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	L
25 (36)	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	R
26 (37)	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	ML

27 (38)	300 A / 30 V	300 A / 30 V	90 cm/min	105°C	MR
---------	--------------	--------------	-----------	-------	----

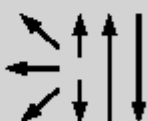
*\*Lage in Schweißrichtung: M - Mitte / R - rechts / L - links*

# Datenblatt Schweißzusatzwerkstoff Union X96 (für Wurzellage)



## Union X 96

Massivdraht, niedriglegiert

Normbezeichnungen						
EN ISO 16834-A			AWS A5.28			
G 89 5 M21 Mn4Ni2,5CrMo			ER120S-G			
Eigenschaften und Anwendungsgebiete						
Niedriglegiert Massivdrahtelektrode für das Schutzgasschweißen von vergüteten und thermomechanisch behandelten Feinkornbaustählen im Kran- und Fahrzeugbau. Gutes Verformungsverhalten bei höchsten Festigkeitswerten. Gute Kaltrissicherheit durch hohen Reinheitsgrad der Drahtoberfläche.						
Grundwerkstoffe						
S960QL (alform 960; Dillidur 960; Weldox 960; XABO 960), S890QL (Dillidur 890; Weldox 890; XABO 890), S890MC (alform 900 M; Domex 900) S960MC (alform 960 M; Domex 960) OX 1002						
Richtanalyse des Massivdrahtes (Gew.-%)						
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
Gew.-%	0,12	0,80	1,90	0,45	0,55	2,35
Mechanische Gütewerte des Schweißgutes						
Wärme- behandlung	Schutzgas	Dehngrenze R <sub>p0,2</sub>	Zugfestigkeit R <sub>m</sub>	Dehnung A (L <sub>0</sub> =5d <sub>0</sub> )	Kerbschlagarbeit ISO-V KV J	
		MPa	MPa	%	+20 °C	-50 °C
u	M21	930	980	14	80	47
Verarbeitungshinweise						
	Stromart: DC ( + )	Schutzgas: (EN ISO 14175) M2	ø mm		Spulung:	
			0,8		B300	
			1,0		B300	
			1,2		B300	
Zulassungen						
DB (42.132.26), CE						

# **Protokoll der Sichtprüfung**

Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt  
Mecklenburg-Vorpommern GmbH



<b>Sichtprüfung nach DIN EN ISO 17637</b> <i>Visual testing acc. to DIN EN ISO 17637</i> <b>Bericht-Nr. VT 100916</b> <i>report no.</i>	
Auftraggeber: client:	SLV M-V Abt. F&E
Auftrags-Nr. order no.	210-710-16-000

Angaben zum Prüfstück <i>data of test object</i>			
Probennummer: <i>sample no.</i>	0868/16	(p)WPS-Nr.: <i>(p)WPS no.</i>	ohne
Bauteil: <i>test object</i>	VP Stumpfnahht Diplomprojekt Tietböhl	Zeichnungs-Nr. <i>drawing no.</i>	ohne
Bauteilabmessung: <i>component size</i>	t=50mm, L=350mm	Nahtart/Stoßart: <i>weld type</i>	Stumpfnahht
Prüfbereich: <i>test range</i>	Schweißnaht + WEZ	Prüfumfang: <i>extent of testing</i>	100%
Werkstoff: <i>material</i>	S960QL	Wärmebehandlung: <i>heat treatment</i>	ohne
Oberflächenzustand: <i>surface condition</i>	metallisch blank	Schweißprozess: <i>welding process</i>	121

Normative Angaben <i>standards</i>			
Prüfnorm: <i>standard</i>	DIN EN ISO 17637	mitgeltende Norm: <i>further standards</i>	DIN EN ISO 15614-1
Bewertung nach: <i>acceptance level</i>	DIN EN ISO 5817 Bewertungsgruppe B		
Abweichungen von der Prüfnorm: <i>deviations from the standard</i>	Laut DIN EN ISO 15614-1 nach Bewertungsgruppe C zu bewerten: zu große Wurzelüberhöhung, scharfer Nahtübergang, (nur Kehlnaht: zu große Nahtüberhöhung, zu große Kehlnahtdicke)		

Angaben zur Sichtprüfung <i>data of visual testing</i>			
<input checked="" type="checkbox"/> direkte Sichtprüfung ohne Hilfsmittel <i>direct visual testing without ancillary equipment</i>	<input type="checkbox"/> direkte Sichtprüfung mit Hilfsmittel <i>direct visual testing with ancillary equipment</i>	<input type="checkbox"/> indirekte Sichtprüfung <i>indirect visual testing</i>	
Hilfsmittel (z.B. Lupe, Spiegel): <i>ancillary equipment</i>			
Prüfgeräte (z.B. Endoskop, Kamera): <i>test equipment</i>			
Beleuchtung (z.B. Lampentyp, Abstand, Winkel): <i>lighting equipment</i>			
Messgerät und Beleuchtungsstärke: <i>type of luxmeter and illumination level</i>		Testo 540	780 lx
Messmittel (z.B. Messschieber, Schweißnahtlehre): <i>gauge</i>		3 Skalen Schweißnahtlehre, Messschieber, Stahlmaßstab	

Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt nur für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren. Dieser Bericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die gekürzte oder die auszugsweise Vervielfältigung und eine Veröffentlichung sind nur mit vorheriger schriftlicher Genehmigung zulässig.  
The content of this report may only be copied or distributed completely. No extracts or abridged versions are allowed to be copied or distributed by a third party.

page 1 of 2

Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt M-V GmbH • Alter Hafen Süd 4 • 18069 Rostock  
Tel.: +49 (0)381 - 811 50 10 • Fax: +49 (0)381 - 811 50 99 • E-Mail: [labon@slv-rostock.de](mailto:labon@slv-rostock.de) • Internet: [www.slv-rostock.de](http://www.slv-rostock.de)



Sichtprüfung nach DIN EN ISO 17637 Visual testing acc. to DIN EN ISO 17637																	
Bericht-Nr. VT 100916 report-no.																	
Auftraggeber: SLV M-V Abt. F&E client						Auftrags-Nr. 210-710-16-000 order-no.											
Nahtabmessungen: dimensions of weld		Kehlnaht fillet weld				Stumpfnahat butt weld											
Position [mm] position	a-Maß [mm] throat thickness	Nahtbreite [mm] root width	Schenkel- länge z1 [mm] leg length z1	Schenkel- länge z2 [mm] leg length z2	Nahtüber- höhung [mm] excess weld metal	Nahtbreite [mm] weld width	Wurzelüber- höhung [mm] excess penetra- tion	Wurzel- breite [mm] root width									
Probe I 100					1,6	35,3	3,0	24,3									
Probe II																	
Prüfergebnis result																	
Itd. Nr. No.	Unregelmäßigkeit nach DIN EN ISO 6520-1 irregularities acc. to DIN EN ISO 6520-1										Zulässigkeits- grenze indication limit [mm]	Ist-Wert actual value [mm]	ggf. Position position [mm]	Bewertung result			
	507	-	-	-	-	-	-	-	-	-				erfüllt accepted	nicht erfüllt not accepted		
1	X										3,00	1,30		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
														<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
														<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Bemerkungen remarks																	
Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die Prüfgegenstände zum Zeitpunkt der Prüfung. Die Beurteilung des Prüfobjektes berücksichtigt nur Unregelmäßigkeiten, die mit der angewandten Prüfmethode auffindbar sind. The test results solely refer to the tested objects at the time of the examination. They only take into account irregularities which can be found by the applied test method.																	
Gesamtbewertung: evaluation		Bestanden: accepted <input checked="" type="checkbox"/>				Nicht bestanden: not accepted <input type="checkbox"/>				Prüfer: O. Hennig (21335) Inspector DIN EN ISO 9712 - VT-Stufe 2							
Prüfort: test place		Rostock				Prüfdatum: date of testing				19.09.2016				Abteilungsleiter WT: head of dept. materials testing		Dr.-Ing. G. Winkel	
Checkliste Beurteilung checklist																	
Ordnungsnummer reference number	Prüfmerkmal inspection feature				Ordnungsnummer reference number	Prüfmerkmal inspection feature											
507	Kantenversatz (linear misalignment)				-												
-					-												
-					-												
-					-												
-					-												
-					-												

Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt nur für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren. Dieser Bericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die gekürzte oder die auszugsweise Vervielfältigung und eine Veröffentlichung sind nur mit vorheriger schriftlicher Genehmigung zulässig.  
The content of this report may only be copied or distributed completely. No extracts or abridged versions are allowed to be copied or distributed by a third party.

page 2 of 2

# **Protokoll der Magnetpulverprüfung**

Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt  
Mecklenburg-Vorpommern GmbH



<b>Oberflächenrissprüfung / Magnetpulverprüfung</b> <i>surface crack detection / magnetic particle testing</i>										
<b>Bericht-Nr. MT 100916</b> <i>report-no.</i>										
Auftraggeber: <i>client</i> SLV M-V Abt. F&E				Auftrag-Nr.: <i>order no.</i> 210-710-16-000						
Prüfart: <i>test place</i> Rostock				Prüfdatum: <i>date of testing</i> 19.09.2016						
Angaben zum Prüfstück <i>data of test object</i>										
Bauteil: <i>test object</i> VP Stumpfnahht Diplomprojekt Tietbühl, (0866/16)		(p)WPS-Nr.: <i>(p)WPS-no.</i> ohne								
Prüfbereich: <i>test range</i> SN+WEZ		Zeichnungsnummer: <i>drawing-no.</i> ohne								
Prüfumfang: <i>extent of testing</i> 100%		Nahtart/Stoßart: <i>weld type</i> Stumpfnahht								
Werkstoff: <i>material</i> S960QL, t = 50 mm		Wärmebehandlung: <i>heat treatment</i> nein								
Oberflächenzustand: <i>surface condition</i> metallisch blank		Schweißprozess: <i>welding process</i> 121								
Normative Angaben <i>standards</i>										
Prüfnorm: <i>standard</i> DIN EN ISO 17638				Bewertung nach: <i>acceptance level</i> DIN EN ISO 23278, Zulässigkeitsgrenze 2x						
Abweichungen von der Prüfnorm: <i>deviations from the standard</i> keine										
Angaben zur Magnetpulverprüfung <i>data of magnetic particle inspection</i>										
Magnetisierungsgerät: <i>magnetizing device</i> Karl Deutsch Deutropuls				Geräte-Nr.: <i>device-no.</i> Typ: 3446.230						
Prüfmittelkontrolle: <i>test check method</i> VK Nr. 1 nach DIN EN ISO 9934-2, Vergleich mit Foto				Magnetisierungsart nach DIN EN ISO 9934-1: <i>kind of magnetization acc. to ISO 9934-1</i> Jochmagnet						
Prüfmittelhersteller: <i>test medium manufacturer</i> MR Chemie				Magnetisierungsfeldstärke: <i>magnetisation field strength</i> 3,8 kA/m						
Prüfmittel: <i>test medium</i> MR221GF (Charge 1032A)				Entmagnetisierung: <i>demagnetization</i> keine						
Kontrastmittel: <i>contrast medium</i> MR72 (Charge 1067A)				Bilderzeugung: <i>picture generation</i> schwarz-weiß						
Kontrolle der Prüfbedingungen <i>control of inspection conditions</i>										
Beleuchtungsstärke: <i>illumination intensity</i> 780 lx				Messgerät: <i>measuring device</i> Testo MF M200.6.S309						
Bestrahlungsstärke: <i>lighting power</i>				Messgerät: <i>measuring device</i>						
Prüfresultat <i>result</i>										
Naht-Nr. / Prüfabschnitt: <i>weld-seam no. / examination area</i>	Abmessung in mm <i>dimension</i>	Fehlerlage <i>position</i>			fehlerfrei <i>accurate</i>	Anzeigetyp in mm <i>type of indication</i>		Bewertung <i>evaluation</i>		Bemerkungen <i>remarks</i>
		G <i>bs</i>	U <i>haz</i>	S <i>wn</i>		linear <i>linear</i>	nicht linear <i>not linear</i>	e <i>e</i>	ne <i>ne</i>	
0866/16	L=470	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die Prüfgegenstände zum Zeitpunkt der Prüfung. Die Beurteilung des Prüfobjektes berücksichtigt nur Unregelmäßigkeiten, die mit der angewandten Prüfmethode auffindbar sind. <i>The test results solely refer to the tested objects at the time of the examination. They only take into account irregularities which can be found by the applied test method.</i>										
Ort: <i>place</i> Rostock	Datum: <i>date</i> 19.09.2016	Prüfer: <i>inspector</i> O. Hennig (39358-MT2) DIN EN ISO 9712 - MT Level 2		Abteilungsleiter WT: Dr.-Ing. G. Winkel <i>head of dept. materials testing</i>						

Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt nur für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren. Dieser Bericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die gekürzte oder die auszugsweise Vervielfältigung und eine Veröffentlichung sind nur mit vorheriger schriftlicher Genehmigung zulässig.  
*The content of this report may only be copied or distributed completely. No extracts or abridged versions are allowed to be copied or distributed by a third party.*

Seite (page) 1 of 1

Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt M-V GmbH • Alter Hafen Süd 4 • 18069 Rostock  
 Tel.: +49 (0)381 - 811 50 10 • Fax: +49 (0)381 - 811 50 99 • E-Mail: labor@slv-rostock.de • Internet: www.slv-rostock.de



# Protokoll der Ultraschallprüfung

Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt  
Mecklenburg-Vorpommern GmbH



<b>Prüfbericht - Ultraschallprüfung (UT)</b> <small>test report - ultrasonic testing (UT)</small> <b>Bericht-Nr. UT 010716_ Rev. 00</b> <small>report No.</small>					
SLV- Auftr. Nr.: <small>SLV-order No.</small>	210-710-16-000		Abteilung: <small>department</small>	WT	
Auftraggeber: <small>client</small>	SLV M-V Abt. F&E		Datum der Prüfung: <small>date of examination</small>	19.09.2016	
Proben Nr.: <small>sample No.</small>	0866/16		Prüfart: <small>test location</small>	Rostock	
<b>1) Angaben zum Prüfstück</b> <small>data of test object</small>					
Prüfobjekt - Nr./Werkstoff: <small>test object - no./material</small>	VP Stumpfnäht S960QL Diplomprojekt Tiefbohl				
Erzeugnisform/ Fertigungszustand: <small>product form/ stage of condition</small>	Blech t = 50 mm	Oberflächenzustand: <small>surface condition</small>	Prüffläche Ra ≥ 6,3 µm/ Schweißnaht gereinigt		
Prüfumfang: <small>scope of testing</small>	Schweißnähte + 1,25sp	Wärmebehandlung: <small>heat treatment</small>	-		
Schweißprozess, Schweißspezifikation/WPS <small>welding process, welding specification/WPS</small>	121	Stoßart / Nahtart: <small>weld type</small>	Stumpfnäht		
Bauteilabmessungen (ggf. Anhang nutzen) <small>dimensions (in appendix use)</small>	t=50mm / L=470mm				
Prüfbereich (ggf. Anhang nutzen): <small>test range (in appendix use)</small>	100% SN+ WEZ				
<b>2) Normative Angaben</b> <small>standards</small>					
Prüfung nach: <small>testing acc. to</small>	DIN EN ISO 17640			Prüfklasse: <small>test class</small>	B
Anforderung / Bewertung nach: <small>requirements/ evaluation acc. to</small>	DIN EN ISO 11666, Zulässigkeitsgrenze 2				
<b>3) Prüftechnik</b> <small>test parameters</small>					
<b>3.1) Prüfausrüstung</b> <small>test equipment</small>					
	Fabrikat (make) Typ (type)	ggf. Ident. Nr. <small>I. n. Ident no.-</small>	Koppelmittel <small>couplant</small>	Koppelpaste / coupler paste	
Ultraschallgerät: <small>ultrasonic test instrument</small>	USM Go	34944	ggf. wirklicher Einschallwinkel <small>I. n. real angle of incidence</small>	Prüfkopf- Nennfrequenz: <small>transceiver-nominal frequency</small>	Einschall- positionen <small>Search Positions</small>
Prüfkopf: <small>transceiver</small>	1) SWB-45: 2) SWB-60: 3) MSEB-4	58414 58415 50497	46° 62° 0°	2MHz 2MHz 4MHz	A
Justierreflektor(en): <small>calibration block(s)</small>	Entfernung <small>distance</small>	Justierbe- reich <small>Calibration range</small> (mm)	Bezugsreflektor <small>Calibration block reflector</small>	Bewertungsmethode <small>evaluation method</small>	
	1) K2/R25 2) K1/R100 3) Stufenkeil	100 100 12,5/25,0	-- --	AVG - Methode (Typ2) AVG-method (Typ2)	
Registriergrenze: <small>Recording threshold</small>	AVG 3,0 mm		Prüfstücktemperatur: <small>(temperature of test object)</small>	RT	



<b>Prüfbericht - Ultraschallprüfung (UT)</b> test report - ultrasonic testing (UT) <b>Bericht-Nr. UT 010716_ Rev. 00</b> report No.									
SLV- Auftr. Nr.: SLV-order No.	210-710-16-000				Abteilung: department	WT			
Auftraggeber: client	SLV M-V Abt. F&E				Datum der Prüfung: date of examination	19.09.2016			
Proben Nr.: sample No.	0866/16				Prüfart: test location	Rostock			
Angaben über die verwendete Registerschwelle. (Details of the reporting level.)									
Justierstrecke SJ calibration	Grundverstärkung VJ ( dB ) basic adjustment	Verstärkungszuschlag ΔV ( dB ) reinforcement addition	Transferkorrektur ΔVT ( dB ) transfer correction	Prüfverstärkung VR ( dB ) amplification testing	Suchverstärkung ΔVs ( dB ) search adjustment				
1) 100	49,0	4	4,0	10	+12				
2) 100	51,0	3	4,0	10	+12				
3) 12,5 – 25,0	46,0	-	4,0	-	+12				
<b>4.1) Befund / test result</b> (Bitte beachten Sie ggf. auch die Anlage. / Please consider if necessary also the attachment.)									
<b>4.1) Prüfergebnisse:</b> Inspection results									
Kennzeichnung des geprüften Teiles Identification of the tested object			Anzeigepflichtige Unregelmäßigkeiten (z. B. Fehlerlage, Fehlerverteilung, Fehlerausdehnung, Fehleranzahl) Indication mandatory discontinuities acc. to (e. g. details of location, type of indications, distributions, sizes and numbers)						
Nahbezeichnung/ Prüfabschnitt/ Weiß label/ Test position	Prüflänge Test length ( mm )	Einbaupositionen Search positions	PK Nummer TH Number	Abstand vom Bezugspunkt Distance from reference point ( mm )	Einbaulage Registerschwelle Indication height > reporting level ( dB )	Einbaufehler Querbohrung Reference reflector Side drilled hole GB (mm)	Registrierlänge Recording length ( mm )	Tiefenlage Depth position ( mm )	Bewertung evaluation e/ ne
Bemerkung:									
allgemeine Bemerkungen: general remarks			*e = erfüllt / acceptable ne = nicht erfüllt / not acceptable						
<b>4.2) B E W E R T U N G (evaluation)</b> Anforderung erfüllt - es wurden keine unzulässigen Anzeigen festgestellt. (Requirement fulfilled - there are no unacceptable discontinuities detected.)									
Prüfer (operator)	O. Hennig								
UT-Stufe (UT-level)	II [DGZP- Cert.Nr.: 38358-UT2]								
Prüfaufsicht (supervisor)	-				Rostock, den		19.09.2016		
UT-Stufe (UT-level)	-				Rostock, the				
UT-Stufe Zertifizierung nach (UT-level certification acc. to) DIN EN ISO 9712									
Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die Prüfgegenstände zum Zeitpunkt der Prüfung. Die Beurteilung des Prüfobjektes berücksichtigt nur Unregelmäßigkeiten, die mit der angewandten Prüfmethode auffindbar sind. (The test results solely refer to the tested objects at the time of the examination. They only take into account irregularities which can be found by the applied test method.)									



## Protokolle der Kerbschlagbiegeversuche (Hauptversuch)

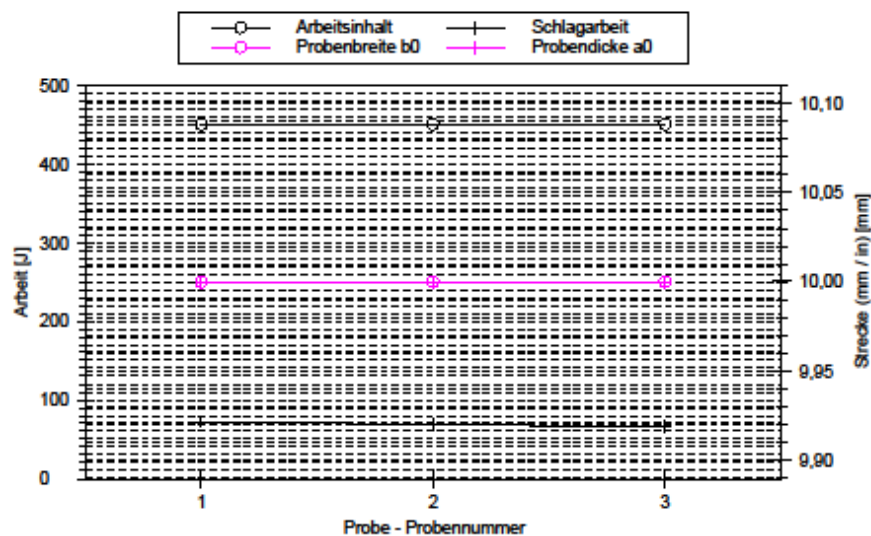
#### Parametertabelle:

Kunde : FuE - Diplomprojekt Tietböhl  
 SLV-Kundennr. :  
 SLV-Auftragsnr. : 0886/16  
 Probenname : VP Diplomprojekt Tietböhl S980 50mm  
 Material : S980QL / 50mm  
 Probenmaße : 10 x 10 x 55  
 Prüfbedingungen : Decklage / -40°C / SG  
 Prüfer : Buder

#### Ergebnisse:

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10,0	450,00	71,84	15,96	Charpy
2	10	10,0	450,00	68,73	15,27	Charpy
3	10	10,0	450,00	65,35	14,52	Charpy

#### Parametergrafik:



#### Statistik:

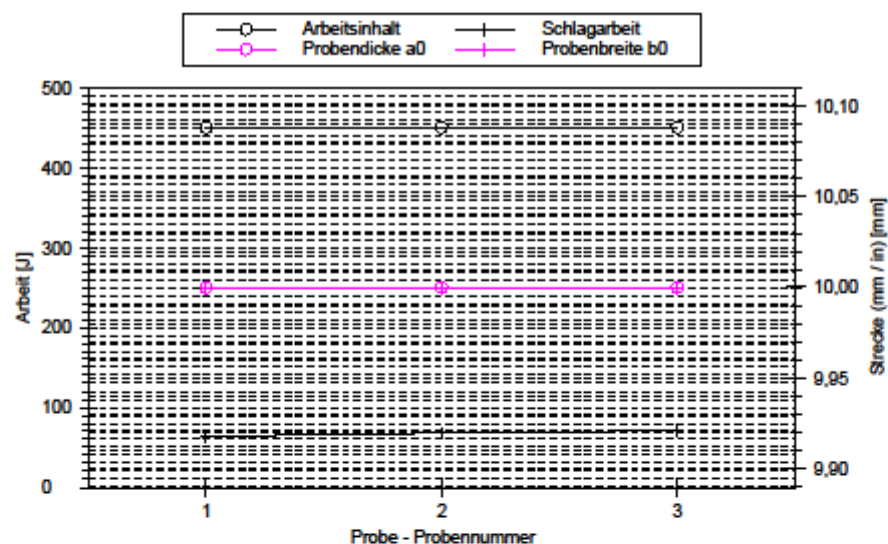
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10,0	450,00	68,64	15,25
s	0,000	0,0	0,00	3,25	0,72
v	0,00	0,00	0,00	4,73	4,73

**Parametertabelle:**

Kunde : FuE - Diplomprojekt Tietböhl  
 SLV-Kundennr. :  
 SLV-Auftragsnr. : 0866/16  
 Probenname : VP Diplomprojekt Tietböhl S960 50mm  
 Material : S960QL / 50mm  
 Probenmaße : 10 x 10 x 55  
 Prüfbedingungen: Decklage / -40°C / SL  
 Prüfer : Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10,0	450,00	63,50	14,11	Charpy
2	10	10,0	450,00	67,83	15,07	Charpy
3	10	10,0	450,00	70,94	15,76	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

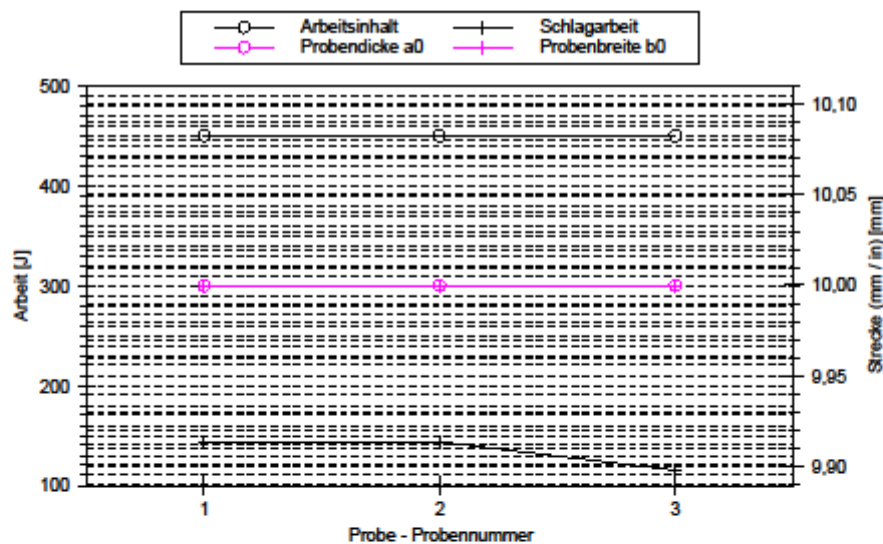
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
$\bar{x}$	10	10,0	450,00	67,42	14,98
s	0,000	0,0	0,00	3,74	0,83
v	0,00	0,00	0,00	5,54	5,54

**Parametertabelle:**

Kunde : FuE - Diplomprojekt Tietböhl  
 SLV-Kundenr. :  
 SLV-Auftragsnr. : 0866/16  
 Probenname : VP Diplomprojekt Tietböhl S960 50mm  
 Material : S960QL / 50mm  
 Probenmaße : 10 x 10 x 55  
 Prüfbedingungen: Decklage / -40°C / SL+2mm  
 Prüfer : Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10,0	450,00	142,83	31,74	Charpy
2	10	10,0	450,00	143,55	31,90	Charpy
3	10	10,0	450,00	114,88	25,53	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

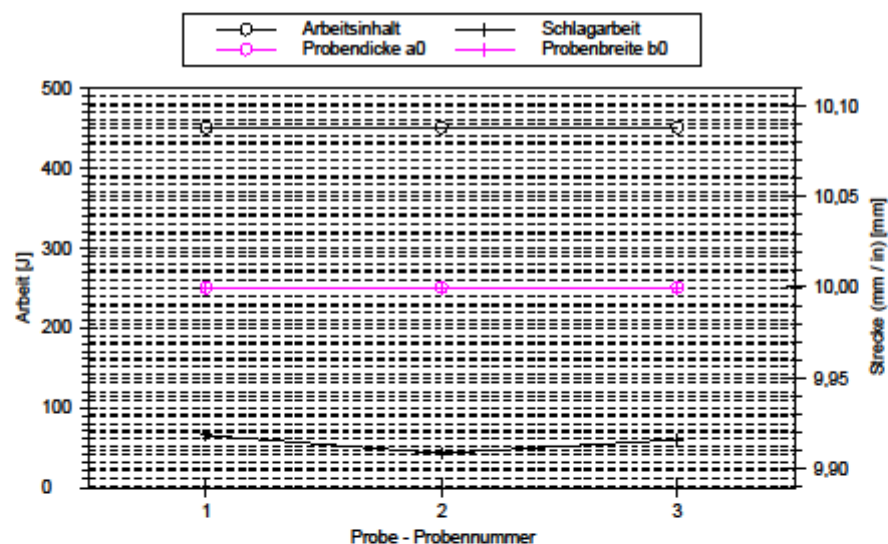
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
$\bar{x}$	10	10,0	450,00	133,75	29,72
$s$	0,000	0,0	0,00	16,34	3,63
$v$	0,00	0,00	0,00	12,22	12,22

**Parametertabelle:**

Kunde : FuE - Diplomprojekt Tietböhl  
 SLV-Kundennr. :  
 SLV-Auftragsnr. : 0866/16  
 Probenname : VP Diplomprojekt Tietböhl S960 50mm  
 Material : S960QL / 50mm  
 Probenmaße : 10 x 10 x 55  
 Prüfbedingungen: Decklage / -40°C / SL+5mm  
 Prüfer : Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10,0	450,00	64,72	14,38	Charpy
2	10	10,0	450,00	42,27	9,39	Charpy
3	10	10,0	450,00	59,28	13,17	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

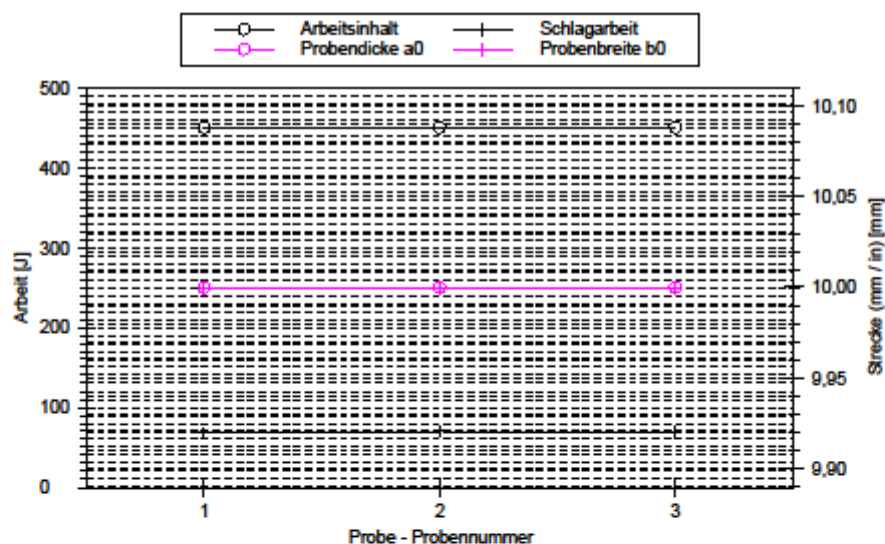
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
$\bar{x}$	10	10,0	450,00	55,42	12,31
s	0,000	0,0	0,00	11,71	2,60
v	0,00	0,00	0,00	21,13	21,13

**Parametertabelle:**

Kunde : FuE - Diplomprojekt Tietböhl  
 SLV-Kundenr. :  
 SLV-Auftragsnr. : 0866/16  
 Probenname : VP Diplomprojekt Tietböhl S960 50mm  
 Material : S960QL / 50mm  
 Probenmaße : 10 x 10 x 55  
 Prüfbedingungen : Blechmitte / -40°C / SG  
 Prüfer : Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10,0	450,00	67,83	15,07	Charpy
2	10	10,0	450,00	69,99	15,55	Charpy
3	10	10,0	450,00	68,41	15,20	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

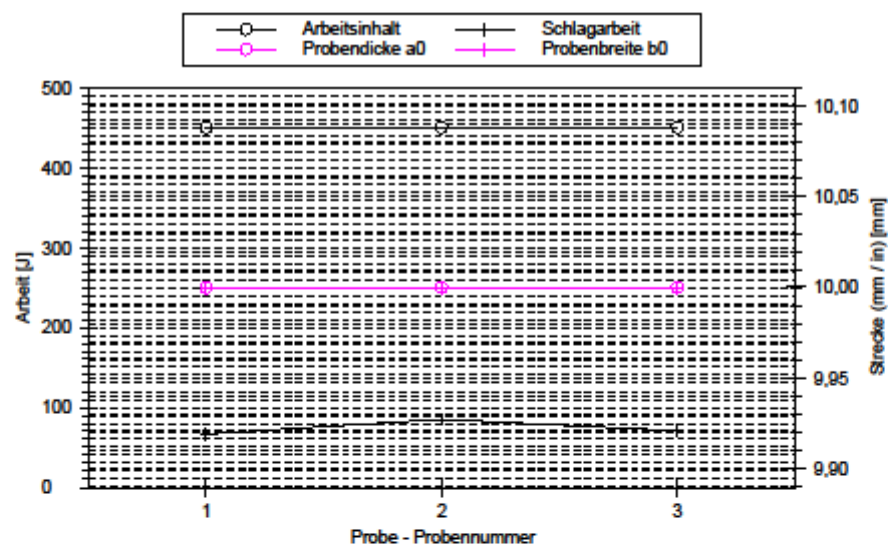
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10,0	450,00	68,74	15,28
s	0,000	0,0	0,00	1,12	0,25
v	0,00	0,00	0,00	1,63	1,63

**Parametertabelle:**

Kunde : FuE - Diplomprojekt Tietböhl  
 SLV-Kundennr. :  
 SLV-Auftragsnr. : 0866/16  
 Probenname : VP Diplomprojekt Tietböhl S960 50mm  
 Material : S960QL / 50mm  
 Probenmaße : 10 x 10 x 55  
 Prüfbedingungen : Blechmitte / -40°C / SL  
 Prüfer : Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10,0	450,00	66,57	14,79	Charpy
2	10	10,0	450,00	84,69	18,82	Charpy
3	10	10,0	450,00	70,62	15,69	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

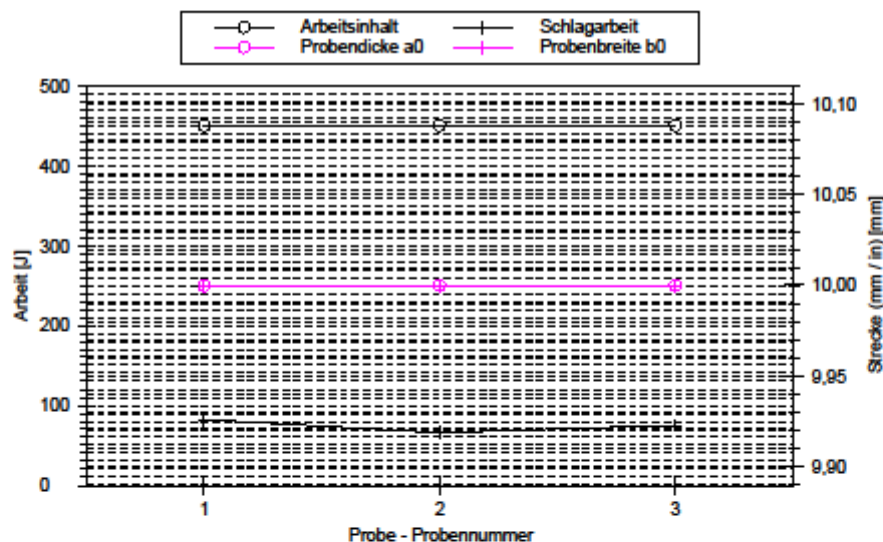
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
$\bar{x}$	10	10,0	450,00	73,96	16,44
s	0,000	0,0	0,00	9,51	2,11
v	0,00	0,00	0,00	12,86	12,86

**Parametertabelle:**

Kunde : FuE - Diplomprojekt Tietböhl  
 SLV-Kundenr. :  
 SLV-Auftragsnr. : 0866/16  
 Probenname : VP Diplomprojekt Tietböhl S960 50mm  
 Material : S960QL / 50mm  
 Probenmaße : 10 x 10 x 55  
 Prüfbedingungen : Blechmitte / -40°C / SL+2mm  
 Prüfer : Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10,0	450,00	81,76	18,17	Charpy
2	10	10,0	450,00	65,93	14,65	Charpy
3	10	10,0	450,00	74,68	16,60	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

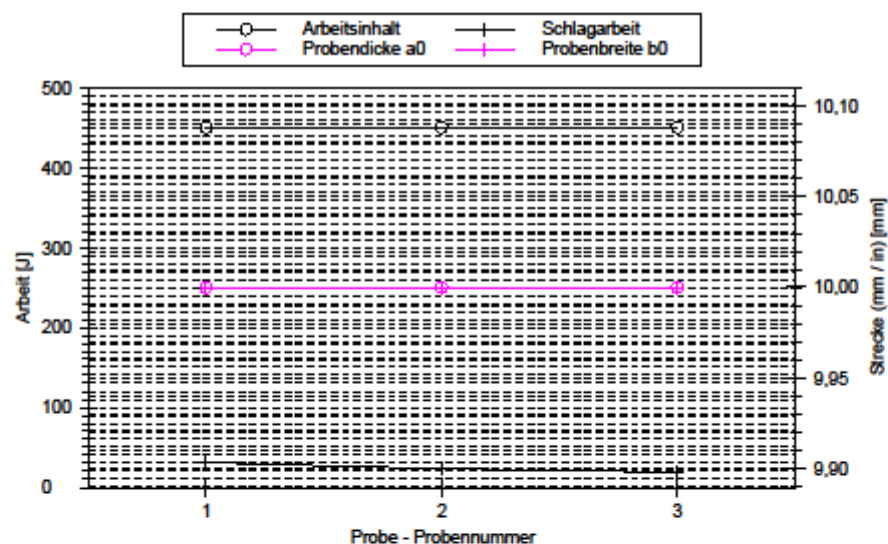
Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
x	10	10,0	450,00	74,12	16,47
s	0,000	0,0	0,00	7,93	1,76
v	0,00	0,00	0,00	10,69	10,69

**Parametertabelle:**

Kunde : FuE - Diplomprojekt Tietböhl  
 SLV-Kundennr. :  
 SLV-Auftragsnr. : 0866/16  
 Probenname : VP Diplomprojekt Tietböhl S960 50mm  
 Material : S960QL / 50mm  
 Probenmaße : 10 x 10 x 55  
 Prüfbedingungen : Blechmitte / -40°C / SL+5mm  
 Prüfer : Buder

**Ergebnisse:**

Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %	Versuchsart PSW
1	10	10,0	450,00	30,99	6,89	Charpy
2	10	10,0	450,00	22,92	5,09	Charpy
3	10	10,0	450,00	18,82	4,18	Charpy

**Parametergrafik:****Statistik:**

Serie n = 3	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Arbeitsinhalt J	Schlagarbeit J	Schlagarbeit %
$\bar{x}$	10	10,0	450,00	24,24	5,39
s	0,000	0,0	0,00	6,20	1,38
v	0,00	0,00	0,00	25,55	25,55



## Protokoll der Zugversuche



### Zugversuch

#### Parametertabelle:

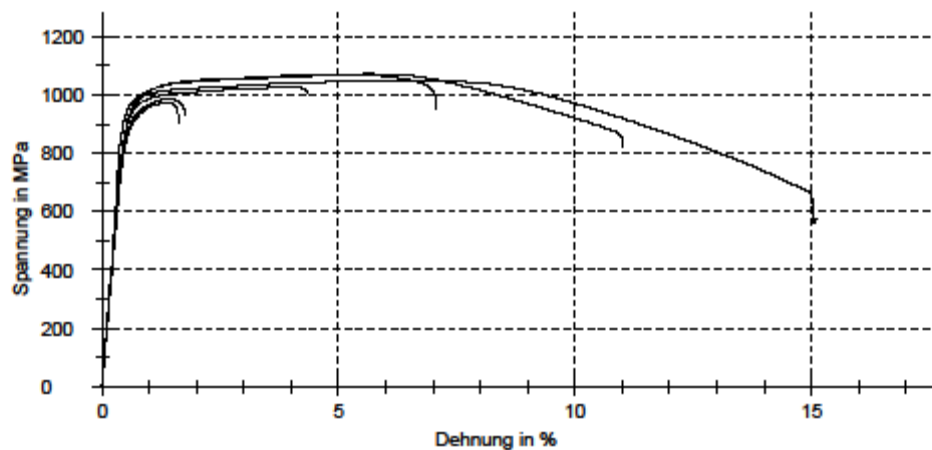
Auftraggeber	: FuE - Diplomprojekt Tietböhl	Prüfer	: Buder
SLV-Kundennr.	:	Prüfdatum	: 23.09.2016
SLV-Auftragsnr.	: 0866/16	Bemerkung	: Bruchlage:
Probennr.	: VP Stumpfnah / UP / PA / beidseitig		Z1.1 - SG
Werkstoff	: S960QL / 50mm		Z1.2 - SG
			Z1.3 - SG
			Z2.1 - SG
			Z2.2 - GW
			Z2.3 - SG

#### Ergebnisse:

Nr	Probenkennz.	Probendicke a0 mm	Probenbreite b0 mm	S0 mm <sup>2</sup>	Rp 0,2 MPa	ReH MPa	Rm MPa	Fmax kN
1	Z1-1	19,8	20,0	396,0	911	-	974	385,823
2	Z2-1	19,8	20,0	396,0	926	-	984	389,854
3	Z1-2	19,7	20,0	394,0	952	-	1026	404,167
4	Z2-2	19,8	20,0	396,0	980	-	1049	415,411
5	Z1-3	19,7	20,0	394,0	966	-	1072	422,344
6	Z2-3	19,7	20,0	394,0	969	-	1067	420,327

#### Statistik:

Serie n = 6	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	S0 mm <sup>2</sup>	Rp 0,2 MPa	ReH MPa	Rm MPa	Fmax kN
x	20,0	19,8	395,0	951	-	1029	406,321
s	0,0	0,1	1,1	27	-	42	15,694
v	0,00	0,28	0,28	2,83	-	4,05	3,86



**Protokoll der Biegeversuche****Biegeversuch****Parametertabelle:**

Auftraggeber : FuE - Diplomprojekt Tietböhl  
 SLV-Kundennr. :  
 SLV-Auftragsnr.: 0886/16  
 Probenbez. : VP Diplomprojekt Tietböhl / PA / UP / beidseitig  
 Werkstoff : S960-40 / 50mm  
 Prüfer : Buder  
 Prüfdatum : 23.09.2016  
 Bemerkung: B1 - Anrisse (2,5mm)  
 B3 - bei 85° gebrochen  
 B4 - Anriss seitlich beginnend (12mm)

**Ergebnisse:**

Nr	Beanspruchung	Dicke mm	Breite mm	Stützweite mm	Biegedorn d mm	F max kN	Biegewinkel	Bewertung
1	B1 - SBB	10,0	50,4	118	90	62,4	180°	e
2	B2 - SBB	10,0	50,5	118	90	62,0	180°	e
3	B3 - SBB	10,0	50,4	118	90	43,6	85°	ne
4	B4 - SBB	10,0	50,3	118	90	60,7	180°	ne

**Statistik:**

Serie n = 4	Dicke mm	Breite mm	Stützweite mm	Biegedorn d mm	F max kN
x	10,0	50,4	118	90	57,2
s	0,0	0,1	0,000	0	9,1
v	0,00	0,16	0,00	0,00	15,88

## Protokoll der Härteprüfung

(Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden nur die Tabellen mit den Härtewerten abgebildet. Die Positionierung der einzelnen Messpunkte erfolgte gemäß Abbildung 36.)



## Härteprüfung

### Parametertabelle:

Auftraggeber : FuE - VP Diplomprojekt Tietböhl  
 SLV-Kundennr. :  
 SLV-Auftragsnr. : 0866/16  
 Werkstoff : S960QL / 50mm  
 Probenbez. : VP UP-Hochfest / Schliff1

Bearbeiter : Buder  
 Prüfdatum : 23.09.2016  
 Bemerkung : 01 - 15 DL  
 16 - 30 Mitte  
 31 - 45 DL

### Ergebnisse:

Nr	Nr	d <sub>h</sub> mm	d <sub>v</sub> mm	d mm	HV 10
1	1	0,230	0,232	0,231	348
2	2	0,230	0,231	0,230	350
3	3	0,229	0,232	0,230	349
4	4	0,217	0,216	0,217	394
5	5	0,218	0,219	0,218	388
6	6	0,225	0,227	0,226	364
7	7	0,227	0,225	0,226	363
8	8	0,227	0,226	0,226	362
9	9	0,240	0,239	0,240	322
10	10	0,219	0,219	0,219	386
11	11	0,212	0,215	0,214	406
12	12	0,214	0,220	0,217	395
13	13	0,231	0,232	0,231	346
14	14	0,233	0,230	0,231	347
15	15	0,233	0,229	0,231	348
Nr	Nr	d <sub>h</sub> mm	d <sub>v</sub> mm	d mm	HV 10
31	31	0,230	0,234	0,232	345
32	32	0,235	0,231	0,233	342
33	33	0,230	0,232	0,231	347
34	34	0,224	0,221	0,222	376
35	35	0,217	0,219	0,218	391
36	36	0,216	0,215	0,216	399
37	37	0,236	0,244	0,240	322
38	38	0,232	0,225	0,228	355
39	39	0,243	0,239	0,241	319
40	40	0,224	0,222	0,223	373
41	41	0,219	0,219	0,219	387
42	42	0,220	0,224	0,222	376
43	43	0,233	0,233	0,233	342
44	44	0,231	0,230	0,230	349
45	45	0,230	0,234	0,232	345

Nr	Nr	d <sub>h</sub> mm	d <sub>v</sub> mm	d mm	HV 10
16	16	0,230	0,235	0,232	344
17	17	0,227	0,236	0,232	345
18	18	0,235	0,230	0,233	342
19	19	0,231	0,232	0,232	345
20	20	0,229	0,234	0,231	346
21	21	0,242	0,241	0,242	318
22	22	0,224	0,226	0,225	367
23	23	0,228	0,233	0,230	349
24	24	0,242	0,241	0,242	318
25	25	0,236	0,237	0,237	331
26	26	0,227	0,230	0,229	355
27	27	0,240	0,235	0,238	329
28	28	0,232	0,236	0,234	339
29	29	0,230	0,234	0,232	345
30	30	0,235	0,237	0,236	333



## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Rostock, den 29. September 2016

Jan Tietböhl